

---

# Akustische Analysen der Sprachproduktion von CI-Trägern

Veronika Neumeyer

---



München 2015

---

# Akustische Analysen der Sprachproduktion von CI-Trägern

Veronika Neumeyer

---

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades der Philosophie  
an der Ludwig-Maximilians-Universität  
München

vorgelegt von  
Veronika Neumeyer

München 2015

Referent: PD Dr. habil. Dr.-Ing. Florian Schiel

Korreferent: Prof. Dr. Phil Hoole

Mündliche Prüfung: 30. Juni 2015

# Zusammenfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist die phonetische Untersuchung der Sprachproduktion von Cochlear Implantat- (CI) Trägern. Ausgewertet wurden Sprachaufnahmen von 48 CI-Trägern und 48 normal hörenden Kontrollgruppensprechern. Im Gegensatz zu bisherigen Studien wurden die CI-Träger nach den Faktoren prä- versus postlingual ertaubt und der Dauer zwischen der Ertaubung und der CI-Versorgung in vier Gruppen eingeteilt. Jeder CI-Gruppe wurde eine in Alter und Geschlecht passende Kontrollgruppe gegenübergestellt. Zusätzlich zu den Sprachaufnahmen von CI-Trägern, die seit mindestens einem Jahr mit einem Cochlear Implantat versorgt sind, wurde in einer Langzeitstudie die Entwicklung der Sprachproduktion von drei postlingual ertaubten CI-Trägern untersucht. Gegenstand war die Zeitspanne von vor der Aktivierung des Sprachprozessors bis ein Jahr nach der CI-Versorgung. Kernthematik der Untersuchungen waren Vokale, Sibilanten und die Zeitstruktur in komplexen Phonemkombinationen. Bei den Vokalen wurde neben den klassischen Parametern wie der ersten und zweiten Formantfrequenz und der Grundfrequenz auch die Größe des Vokalraumes untersucht. Ein weiterer Schwerpunkt wurde auf die Berechnung von Distanzen zwischen Vokalpaaren gelegt, die verschiedenen Artikulationsparametern wie Zungenlage, Zungenhöhe und Lippenrundung zugeordnet werden können. Es wurden für alle vier CI-Gruppen sowohl für F0 als auch für F1 und F2 Unterschiede zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern gefunden. Die Abweichungen bei den postlingual ertaubten Sprechern sind vor allem darauf zurückzuführen, dass sie versuchen, ihre eigene Sprache trotz des eingeschränkten Feedbacks eines Cochlear Implantats wieder so wahrzunehmen wie vor der Ertaubung. Insgesamt ist bei den Vokalen festzuhalten, dass sich vor allem eine größere Dauer zwischen der Ertaubung und der Versorgung (vor allem bei den prälingual ertaubten CI-Trägern) negativ auswirkt, was zum Beispiel in kleineren Vokalräumen der CI-Träger resultiert. Bei der Sibilantenanalyse wurden neben dem DCT-geglätteten Gipfel im Spektrum auch die Differenz der spektralen Steigung und vier spektrale Momente ausgewertet. Für alle vier Gruppen von CI-Trägern wurden im Vergleich zu den Kontrollgruppen tiefere Werte des ersten spektralen Moments sowohl für /s/ als auch für /S/ gefunden. Außerdem wurden für /s/ mehr signifikante Unterschiede gefunden als für /S/. Insgesamt ist festzuhalten, dass /s/ und /S/ bei den CI-Trägern näher zusammenliegen als bei den normal Hörenden. Die Analyse der Zeitstruktur von komplexen Phonemkombinationen beinhaltet sowohl die Untersuchung von Dauerverhältnissen innerhalb eines Onsetclusters als auch die Untersuchung von Dauern eines Einzellautes in beziehungsweise nach unterschiedlich komplexen Clustern. Die größten Unterschiede wurden wiederum bei Sprechern gefunden, die erst längere Zeit nach der Ertaubung mit einem Cochlear Implantat versorgt wurden. Außerdem wurden umso mehr Unterschiede gefunden, je komplexer der Onset war. Eine weitere Erkenntnis dieser Analyse ist, dass sich CI-Träger vor allem dann in den Zeitstrukturen von normal Hörenden unterscheiden, wenn sie Probleme mit der Artikulation eines Einzellautes haben. Die Sprecher der Langzeitstudie haben sich nur hinsichtlich der Produktion der Zeitstrukturen verbessert. Die Verschlechterung bei den Vokalen und Sibilanten lässt darauf schließen, dass die Entwicklung der Sprachproduktion nach einer CI-Versorgung länger dauert als ein Jahr.

# Abstract

This thesis is concerned with the phonetic analysis of speech production by cochlear implant (CI) patients. Analyses were based on recordings of 48 cochlear implant patients and 48 normal hearing speakers. In contrast to previous studies, the CI patients were divided into four groups, depending on whether they are prelingually or postlingually deaf speakers and the period of time between the deafening and the implantation of a cochlear implant. Each group was compared with a matched control group consisting of normal hearing speakers. In addition to the comparison of cochlear implant patients, who have their implants for at least one year, the development of speech production of three postlingually deaf CI patients during the first year after cochlear implantation was investigated in a long term study. Recordings were made before activating the sound processor and one, three, six and twelve months afterwards. Subject of this thesis were investigations of vowel and sibilant production and the production of temporal structures in complex phoneme combinations. The analysis of vowel production is based on classic parameters like the first and second formant frequency and fundamental frequency but also on the dimension of vowel space and on distances between vowels which can be related to articulatory features like the vertical and horizontal position of the tongue and lip rounding. Differences between the groups with cochlear implant patients and their related control groups were found for F0, F1 and F2. The differences for postlingually deaf CI-patients are mainly caused by the attempt to hear their own speech as they had been able before deafness despite the poorer auditory feedback of a cochlear implant. In total, a long period of time between deafness and the provision of a cochlear implant has a negative effect on vowel production which can be seen on smaller vowel spaces for example. Sibilant production was analysed on the basis of peaks in DCT spectra, differences in spectral slopes and four spectral moments. In comparison to their related control groups, for all CI groups lower values for the first spectral moment were found for /s/ and /S/. Additionally, there were more significant differences for /s/ than for /S/. Altogether the values of /s/ and /S/ of the CI patients were more alike than those of the controls. This means CI patients are not able to produce /s/ and /S/ as distinct as normal hearing speakers. The temporal structure analysis of complex phoneme combinations includes an investigation of timing inside an onset cluster and of durations of single phonemes in or after an onset cluster with increasing complexity. Again the biggest differences were found for CI patients with a long period of time between deafness and the provision of a cochlear implant. Additionally more differences occurred the more complex the phoneme structures became. Another finding is that, in temporal structure, CI patients differ from normal hearing particularly if they have problems in articulating a single phoneme within this structure. The three postlingually deaf CI patients taking part in the long term study could only improve their speech production in terms of temporal structure. From their worsening in vowel and sibilant production it can be concluded that one year of rehabilitation after cochlear implant provision is too short to evaluate about their speech production, because the development of their speech production is still in progress.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Technik und Funktionsweise eines Cochlear Implantats . . . . .	2
1.2	Motivation & Zielsetzung . . . . .	5
1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Methode</b>	<b>9</b>
2.1	Sprecher und Gruppeneinteilung . . . . .	9
2.2	Sprachmaterial . . . . .	12
2.3	Datenerhebung . . . . .	13
2.4	Datenbearbeitung . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Vokalanalyse</b>	<b>15</b>
3.1	Motivation und Forschungsfragen . . . . .	15
3.2	Vergleich CI-Träger und normal hörende Sprecher . . . . .	21
3.2.1	Methode . . . . .	22
3.2.1.1	Sprecher . . . . .	22
3.2.1.2	Sprachmaterial . . . . .	23
3.2.1.3	Datenbearbeitung und -auswertung . . . . .	24
3.2.2	Ergebnisse . . . . .	26
3.2.2.1	Formantwerte . . . . .	26
3.2.2.2	Intrinsische Dynamik . . . . .	29
3.2.2.3	Grundfrequenz . . . . .	30
3.2.2.4	Relative Vokaldauern . . . . .	32
3.2.2.5	Vokalräume . . . . .	33
3.2.2.6	Artikulationsbewegungskoeffizienten . . . . .	38
3.2.3	Diskussion . . . . .	39
3.2.3.1	Formantwerte . . . . .	39
3.2.3.2	Grundfrequenz . . . . .	42

3.2.3.3	Artikulationsbewegungskoeffizienten . . . . .	44
3.2.3.4	Vokalräume . . . . .	45
3.2.3.5	Relative Vokaldauern . . . . .	45
3.2.3.6	Überblick Hypothesen . . . . .	46
3.3	Langzeitstudie . . . . .	47
3.3.1	Methode . . . . .	47
3.3.1.1	Sprecher . . . . .	47
3.3.1.2	Sprachmaterial . . . . .	48
3.3.1.3	Datenerhebung . . . . .	48
3.3.1.4	Datenbearbeitung und -auswertung . . . . .	49
3.3.2	Ergebnisse . . . . .	49
3.3.2.1	Formantwerte . . . . .	49
3.3.2.2	Grundfrequenz . . . . .	51
3.3.2.3	Relative Vokaldauern . . . . .	52
3.3.2.4	Vokalräume . . . . .	53
3.3.3	Diskussion . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Sibilantenanalyse</b>	<b>58</b>
4.1	Motivation und Forschungsfragen . . . . .	58
4.2	Vergleich CI-Träger und normal hörende Sprecher . . . . .	67
4.2.1	Methode . . . . .	68
4.2.1.1	Sprecher . . . . .	68
4.2.1.2	Sprachmaterial . . . . .	68
4.2.1.3	Datenbearbeitung und -auswertung . . . . .	69
4.2.2	Ergebnisse . . . . .	74
4.2.2.1	Frequenz des spektralen Gipfels im DCT-Spektrum . .	75
4.2.2.2	Differenz der spektralen Steigung . . . . .	76
4.2.2.3	Spektrale Momente . . . . .	77
4.2.3	Diskussion . . . . .	79
4.2.3.1	Frequenz des spektralen Gipfels im DCT-Spektrum . .	79
4.2.3.2	Differenz der spektralen Steigung . . . . .	80
4.2.3.3	Spektrale Momente . . . . .	81
4.2.3.4	Zusammenfassung . . . . .	82
4.2.3.5	Überblick Hypothesen . . . . .	83
4.3	Langzeitstudie . . . . .	85
4.3.1	Methode . . . . .	85
4.3.1.1	Sprecher . . . . .	85

4.3.1.2	Sprachmaterial . . . . .	85
4.3.1.3	Datenerhebung . . . . .	86
4.3.1.4	Datenbearbeitung und -auswertung . . . . .	86
4.3.2	Ergebnisse . . . . .	86
4.3.2.1	Frequenz des spektralen Gipfels im DCT-Spektrum . .	87
4.3.2.2	Differenz der spektralen Steigung . . . . .	88
4.3.2.3	1. spektrales Moment . . . . .	89
4.3.3	Diskussion . . . . .	89
<b>5</b>	<b>Analyse der Zeitstruktur in komplexen Phonemkombinationen</b>	<b>92</b>
5.1	Motivation und Forschungsfragen . . . . .	92
5.2	Vergleich CI-Träger und normal hörende Sprecher . . . . .	99
5.2.1	Methode . . . . .	100
5.2.1.1	Sprecher . . . . .	100
5.2.1.2	Sprachmaterial . . . . .	100
5.2.1.3	Datenbearbeitung und -auswertung . . . . .	101
5.2.2	Ergebnisse . . . . .	103
5.2.2.1	Dauerverhältnisse innerhalb des Onsetclusters . . . . .	103
5.2.2.2	Relative Dauern . . . . .	106
5.2.2.3	Voice Onset Time (VOT) . . . . .	109
5.2.3	Diskussion . . . . .	109
5.2.3.1	Dauerverhältnisse innerhalb des Onsetclusters . . . . .	110
5.2.3.2	Relative Dauern . . . . .	111
5.2.3.3	Voice Onset Time (VOT) . . . . .	112
5.2.3.4	Zusammenfassung . . . . .	113
5.2.3.5	Überblick Hypothesen . . . . .	113
5.3	Langzeitstudie . . . . .	114
5.3.1	Methode . . . . .	114
5.3.1.1	Sprecher . . . . .	114
5.3.1.2	Sprachmaterial . . . . .	115
5.3.1.3	Datenerhebung . . . . .	115
5.3.1.4	Datenbearbeitung und -auswertung . . . . .	115
5.3.2	Ergebnisse . . . . .	116
5.3.2.1	Dauerverhältnisse innerhalb des Onsetclusters . . . . .	116
5.3.2.2	Relative Dauern . . . . .	119
5.3.2.3	VOT . . . . .	122
5.3.3	Diskussion . . . . .	123



<b>6 Zusammenfassende Diskussion und Ausblick</b>	<b>126</b>
6.1 Vergleich CI-Träger und normal hörende Sprecher . . . . .	127
6.1.1 Vokale . . . . .	127
6.1.2 Sibilanten . . . . .	129
6.1.3 Zeitstruktur in komplexen Phonemkombinationen . . . . .	130
6.2 Langzeitstudie . . . . .	131
6.3 Ausblick & Schlusswort . . . . .	132
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>
<b>A Sprachmaterial</b>	<b>140</b>
<b>B Versuchspersonenübersicht</b>	<b>141</b>
<b>C Danksagung</b>	<b>145</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Externe (a) und interne (b) Komponente eines Cochlear Implantats. (Quelle: MED-EL Elektromedizinische Geräte Gesellschaft m.b.H. (a))	3
1.2	Lage der einzelnen Komponenten eines Cochlear Implantats (oben). Lage des Elektrodenträgers in der Cochlear (unten). (1): Sprachprozessor / (2): Sendespule / (3): Empfänger/Stimulator / (4): Elektrodenträger. (Abbildung von Cochlear Deutschland GmbH & Co. KG (2015) übernommen und ergänzt)	4
2.1	Übersicht über das DIVA-Modell. (Modell aus Guenther et al. (2006) vereinfacht und teilweise ins Deutsche übersetzt.)	11
2.2	Übersicht über die für die Datenverarbeitung verwendeten Tools und die jeweiligen Arbeitsschritte.	14
3.1	Schematische Darstellung der Unterschiede in F1 und F2 zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern getrennt nach Gruppen. Die Pfeile geben an, in welche Richtung der Vokalschwerpunkt der CI-Gruppe im Vergleich zum Schwerpunkt der Kontrollgruppe verschoben ist. Die Länge der Pfeile gibt keine Auskunft über das Ausmaß der Verschiebung. x-Achse: F2 in Hz (fallend), y-Achse F1 in Hz (fallend).	28
3.2	Paarweise Darstellung der F0-Ergebnisse der 4 CI- und KG-Gruppen.	32
3.3	Paarweise Darstellung der Vokalräume der 4 CI- und KG-Gruppen.	35
3.4	Paarweise Darstellung der von den vier gerundeten Vokalen /y:, u:, o:, 2:/ eingeschlossenen Flächen der 4 CI- und KG-Gruppen.	37
3.5	Lage eines Cochlear Implantates: 1: Soundprozessor / 2: Sendespule / 3: Empfänger/Stimulator / 4: Elektrodenträger. Blau hervorgehoben: Cochlear (beziehungsweise Hörschnecke) mit innenliegendem Elektrodenträger. (Abbildung aus Wintermantel & Ha (2008) übernommen und ergänzt.)	41

3.6	Ergebnisse für F0 getrennt nach Sprechern. . . . .	51
3.7	Vergleich der Vokalräume getrennt nach Sprechern. . . . .	54
4.1	Schematische Abbildung des Elektroenträgers eines Cochlear Implan- tats mit 8 Frequenzbändern in der Cochlear. Die Stimulation des Hör- nervs erfolgt frequenzspezifisch in der Schneckenachse zur Nachbildung der Frequenz-Orts-Transformation. Hohe Frequenzen werden an der Schne- ckenbasis, tiefe an der Schneckenspitze abgebildet. Frequenzbänder um- fassen: rot = 250Hz, gelb = 500Hz, grün = 1000Hz. Frequenzbänder werden zur Schneckenbasis (hohe Frequenzen) breiter. (Abbildung aus Wintermantel & Ha (2008) übernommen und ergänzt.) . . . . .	59
4.2	Spektrale Gipfel (roter Punkt) in zwei verschiedenen Frequenzbereichen: links (a): 0 - 22050Hz / rechts (b): 1000 - 20000Hz. In Abbildung (a) liegt der Gipfel bei einem durch die Aufnahme bedingten Artefakt (43Hz). Die Grenzen, an denen das Spektrum oben und unten abgeschnitten wird, sind rot gestrichelt eingetragen. In Abbildung (b) ist der Gipfel bei der maximalen Amplitude (4048Hz). (Versuchsperson Nr. = 58, Phonem = /S/, Wiederholung = 01) . . . . .	70
4.3	Spektrale Gipfel (roter Punkt) im DFT-Spektrum (a): 6977Hz und im DCT-Spektrum (b): 7881Hz. (Versuchsperson Nr. = 91, Phonem = /s/, Wiederholung = 01) . . . . .	70
4.4	Problemfall bei den DCT-geglätteten Spektren: Abbildung (a): DFT- Spektrum, die rot gestrichelten Linien stehen für die Grenzen des aus- gewerteten Bereichs, der rote Punkt markiert den spektralen Gipfel / Abbildung (b): DCT Spektrum, die rot gestrichelten Linien stehen für die Grenzen des ausgewerteten Bereichs, der rote Punkt markiert den aufgrund des Artefakts gemessenen spektralen Gipfel, der graue Punkt markiert den eigentlichen spektralen Gipfel. (Versuchsperson Nr. = 27, Phonem = /S/, Wiederholung = 05) . . . . .	71
4.5	Veranschaulichung der Differenz der spektralen Steigung: Abbildung (a): Spektrum und Regressionslinie von /s/. Steigungen im Bereich a und b sind positiv. Abbildung (b): Spektrum und Regressionslinie von /S/. Steigung im Bereich a ist positiv, im Bereich b negativ. Die Grenze (ge- strichelte Linie) liegt bei 3618.856Hz. (Versuchsperson Nr. = 70, Phonem = /s/: Wiederholung = 02 / Phonem = /S/: Wiederholung = 05) . . .	72
4.6	Spektrale Gipfel im DCT-geglätteten Spektrum: paarweise Anordnung der Ergebnisse für /s/ (links) und /S/ (rechts) pro Gruppe. . . . .	76

4.7	Differenz der spektralen Steigung: paarweise Anordnung der Ergebnisse für /s/ (links) und /S/ (rechts) pro Gruppe. . . . .	76
4.8	Spektrale Momente (1-4): paarweise Anordnung der Ergebnisse für /s/ (links) und /S/ (rechts) pro Gruppe. grau = CI-Träger / weiß = Kontrollgruppe. . . . .	78
4.9	Ergebnisse der Differenz der spektralen Steigung: paarweise Anordnung der Ergebnisse für /s/ (links) und /S/ (rechts). . . . .	88
5.1	Beispiel einer Segmentierung von „streiten“ in Praat (Boersma & Weenink (2001)). (Versuchsperson Nr. = 85, Wiederholung = 04) . . . . .	102
5.2	Ergebnisse der Verhältnisse von normalisierten Phonemdauern in den Onsetclustern von „streiten“ (Abbildung (a), oben), „schreiten“ (Abbildung (b), links unten) und „treiben“ (Abbildung (c), rechts unten). . .	105
5.3	Ergebnisse der S%-Dauern jeweils getrennt nach Wörtern und CI- vs. Kontrollgruppe. Auflistung der Wörter nach steigender Komplexität des Clusters im Onset. . . . .	106
5.4	Ergebnisse der D%-Dauern jeweils getrennt nach Wörtern und CI- vs. Kontrollgruppe. Auflistung der Wörter nach steigender Komplexität des Clusters im Onset. . . . .	108
5.5	Ergebnisse VOT%-Dauern von /t/ in „teilen“. . . . .	109
5.6	Ergebnisse der Verhältnisse von normalisierten Phonemdauern in den Onsetclustern von „streiten“, „schreiten“ und „treiben“ zu den Aufnahmezeitpunkten „prä Aktivierung“ und „1 Jahr“: Abbildung (a): Werte der Kontrollgruppe/ (b): Sprecher 7T / (c): Sprecher 7X / (d): Sprecher 8A. . . . .	118
5.7	Ergebnisse S%-Dauern: Anordnung der Wörter nach aufsteigender Komplexität des Onsets. . . . .	120
5.8	Ergebnisse D%-Dauern: Anordnung der Wörter nach aufsteigender Komplexität des Onsets. . . . .	121
5.9	Ergebnisse VOT%-Dauern von /t/ in „teilen“ getrennt nach Sprechern. Aufnahmetermine: weiß = „prä Aktivierung“ / grau = „1 Jahr“. . . . .	123

# Tabellenverzeichnis

3.1	Gruppenverteilung der CI-Träger und Altersdurchschnitt der einzelnen CI- und Kontrollgruppen. . . . .	22
3.2	Trägersätze und Zielwörter der Vokalanalyse. . . . .	23
3.3	Überblick über die untersuchten Artikulationsbewegungskoeffizienten und die dazugehörigen Distanzen zwischen einzelnen Vokalschwerpunkten. .	25
3.4	Ergebnisse für F1 (oben) und F2 (unten): Obere Zeile: Signifikanzen (gegebenenfalls mit einem „. “ bzw. einem bis drei „*“ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile: Differenz der F1 bzw. F2-Mittelwerte zwischen CI- und KG-Gruppe in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte / negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte). . . . .	27
3.5	Ergebnisse intrinsische Dynamik F1 (oben) & F2 (unten): Obere Zeile: Signifikanzen (gegebenenfalls mit einem „. “ bzw. einem bis drei „*“ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile: Differenz der jeweiligen Mittelwerte zwischen CI- und KG-Gruppe in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte / negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte). . . . .	30
3.6	Ergebnisse Grundfrequenz F0: Obere Zeile: Signifikanzen (gegebenenfalls mit einem „. “ bzw. einem bis drei „*“ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile: Differenz der F0-Mittelwerte zwischen CI- und KG-Gruppe in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte / negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte). . . . .	31

3.7	Ergebnisse relative Vokaldauern (V%-Dauer): Obere Zeile: Signifikanzen (gegebenenfalls mit einem „.“ bzw. einem bis drei „*“ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile: Differenz der V%-Mittelwerte zwischen CI- und KG-Gruppe in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte / negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte). . . . .	33
3.8	Flächen der Vokalräume und des Vierecks mit den Eckpunkten /u:, o:, 2: y:/ (Einheit: $H\text{z}^2$ ): Obere Zeile: Mittelwert CI / Mittlere Zeile: Differenz der Mittelwerte der CI- und KG-Gruppe in Prozent (Positiver Wert = CI > KG = größerer bzw. negativer Wert = CI < KG = kleinerer Vokalraum / Fläche mit den Eckpunkten /u:, o:, 2: y:/) / Untere Zeile: Mittelwert KG. Der jeweils größere Mittelwert ist hervorgehoben. . . . .	34
3.9	Übersicht über die Ergebnisse der Artikulationsbewegungskoeffizienten. Obere Zeile: Mittelwert CI / Mittlere Zeile: Differenz der Mittelwerte der CI- und KG-Gruppe in Prozent (Positiver Wert = CI > KG = längerer bzw. negativer Wert = CI < KG = kürzerer Abstand zwischen den Vokalmittelpunkten) / Untere Zeile: Mittelwert KG. Der jeweils größere Mittelwert ist hervorgehoben. . . . .	38
3.10	Übersicht über die Hypothesen der Vokalanalyse. . . . .	46
3.11	Übersicht über die Sprecher der Langzeitstudie. . . . .	47
3.12	Ergebnisse für F1 (oben) und F2 (unten): Mittelwerte der Formantwerte pro Vokal getrennt nach Aufnahmetermen. Letzten Spalte: Änderung der Mittelwerte von F1 bzw. F2 von der Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors zu der nach einem Jahr CI-Tragedauer erfolgten Aufnahme in Prozent. Positiver Wert: F1/F2-Werte sind gestiegen / negativer Wert: F1/F2-Werte sind gesunken. . . . .	50
3.13	Ergebnisse der Grundfrequenz F0: Mittelwerte der F0-Werte pro Vokal getrennt nach Aufnahmetermen. Letzte Spalte: Änderung der Mittelwerte von F0 von der Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors zu der nach einem Jahr CI-Tragedauer erfolgten Aufnahme in Prozent. Positiver Wert: F0-Werte sind gestiegen / negativer Wert: F0-Werte sind gesunken. . . . .	52

3.14	Ergebnisse der relativen Vokaldauern: Mittelwerte der V%-Dauern pro Vokal getrennt nach Aufnahmeterminen. Letzte Spalte: Änderung der Mittelwerte der V%-Dauern von der Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors zu der nach einem Jahr CI-Tragedauer erfolgten Aufnahme in Prozent. Positiver Wert: V%-Dauern sind länger / negativer Wert: V%-Dauern sind kürzer geworden. . . . .	53
3.15	Ergebnisse der Flächen der Vokalräume getrennt nach Aufnahmeterminen. Letzte Spalte: Änderung der Flächen der Vokalräume von der Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors zu der nach einem Jahr CI-Tragedauer erfolgten Aufnahme in Prozent. Positiver Wert: Fläche des Vokalraumes ist größer geworden / negativer Wert: Fläche des Vokalraumes ist kleiner geworden. . . . .	53
3.16	Übersicht über die Hypothesen der Langzeitanalyse der Vokale. . . . .	57
4.1	Trägersätze und Zielwörter der Sibilantenanalyse. . . . .	69
4.2	Ergebnisse der spektralen Gipfel im DCT-Spektrum, der Differenz der spektralen Steigung und der vier spektralen Momente jeweils getrennt nach /s/ (oben) und /S/ (unten): Obere Zeile: Signifikanzen (gegebenenfalls mit einem „.“ bzw. einem bis drei „*“ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile: Differenz der Mittelwerte des jeweiligen Parameters zwischen CI- und KG-Gruppe in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte / negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte). . . . .	75
4.3	Übersicht über die Hypothesen der Sibilantenanalyse. . . . .	84
4.4	Ergebnisse für die Frequenz des spektralen Gipfels im DCT-Spektrum, die Differenz der spektralen Steigung und des ersten spektralen Moments (Schwerpunkt): Mittelwerte getrennt nach Sibilant und Aufnahmeterminen. Letzten Spalte: Änderung der Mittelwerte von der Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors zu der nach einem Jahr CI-Tragedauer erfolgten Aufnahme in Prozent (positiver Wert: Werte sind gestiegen / negativer Wert: Werte sind gesunken). . . . .	87
4.5	Übersicht über die Hypothesen der Langzeitanalyse der Sibilanten. . . . .	91
5.1	Trägersätze und Zielwörter der Clusteranalyse. . . . .	100

5.2	Ergebnisse der Dauerverhältnisse von /S/ zu /r/ und /t/ zu /r/ innerhalb der Onsetcluster von „streiten“, „schreiten“ und „treiben“: Oberen Zeile: Signifikanzen (gegebenenfalls mit einem „.“ bzw. einem bis drei „*“ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile: Differenzen der Mittelwerte der normalisierten Dauern eines Phonems zwischen CI- und KG-Gruppe getrennt nach Phonemen in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte, negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte). . . . .	104
5.3	Ergebnisse der Daueranalysen: S%-Dauer, D%-Dauer und VOT%-Dauer (von /t/ in „teilen“): Oberen Zeile: Signifikanzen (gegebenenfalls mit einem „.“ bzw. einem bis drei „*“ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile(n): Differenzen der Mittelwerte des jeweiligen Parameters zwischen CI- und KG-Gruppe getrennt nach Wörtern in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte, negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte). . . . .	107
5.4	Übersicht über die Hypothesen der Analyse der Zeitstruktur komplexer Phonemkombinationen (z.T.: die Hypothese konnte nur zum Teil bestätigt werden). . . . .	113
5.5	Übersicht über die normal hörenden Sprecher (Kontrollgruppe der Langzeitstudie). . . . .	114
5.6	Ergebnisse der Dauerverhältnisse von /S/ zu /r/ und /t/ zu /r/ innerhalb der Onsetcluster von „streiten“, „schreiten“ und „treiben“ getrennt nach Sprechern (jeweils 1. Zeile = Werte der Kontrollgruppensprecher): Vergleich der Dauerverhältnisse zum Aufnahmezeitpunkt „prä Aktivierung“ und „1 Jahr“ (Spalte 1 / 2). Änderung der Dauern der einzelnen Phoneme in Prozent (Spalte 3 / 4). positiver Wert = Werte nach „1 Jahr“ > Werte zum Zeitpunkt „prä Aktivierung“, negativer Wert = Werte nach „1 Jahr“ < Werte zum Zeitpunkt „prä Aktivierung“. . . . .	117
5.7	Ergebnisse der Daueranalysen: S%-Dauer, D%-Dauer und VOT%-Dauer getrennt nach Wörtern und Aufnahmetermen („prä Aktivierung“, „1 Monat“, „3 Monate“, „6 Monate“, „1 Jahr“). In der letzten Spalte ist die Änderung der Mittelwerte von der Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors zu der nach einem Jahr CI-Tragedauer erfolgten Aufnahme in Prozent angegeben. Positiver Wert: Werte sind gestiegen / negativer Wert: Werte sind gesunken. . . . .	119
5.8	Normbereich der VOT-Werte von normal hörenden Sprechern. . . . .	122



5.9	Übersicht über die Hypothesen der Langzeitanalyse der Zeitstrukturen komplexer Phonemkombinationen (z.T.: die Hypothese konnte nur zum Teil bestätigt werden). . . . .	125
A.1	Überblick über alle Zielphoneme und Clusterkombinationen im gesamten Sprachmaterial. Gelesen am IPS: jew. 6 Wiederholungen / Audiologie Großhadern: jew. 5 Wiederholungen. . . . .	140
B.1	Tabellarische Übersicht über die an der Studie teilnehmenden CI-Träger – Teil 1. . . . .	142
B.2	Tabellarische Übersicht über die an der Studie teilnehmenden CI-Träger – Teil 2. . . . .	143
B.3	Tabellarische Übersicht über die an der Studie teilnehmenden Kontrollgruppensprecher. . . . .	144

# Kapitel 1

## Einleitung

*Blindheit trennt von den Dingen,  
Taubheit von den Menschen.*

- *Helen Keller* -

Dieses Zitat wird Helen Keller zugeschrieben, einer taubblinden amerikanischen Schriftstellerin, die von 1880 bis 1968 lebte. Obwohl es für sie, die mit 19 Monaten an einer Hirnhautentzündung erkrankte und daraufhin sowohl ertaubte als auch erblindete, keine technischen Hilfen gab, lernte Helen Keller verschiedene Fremdsprachen und erlangte mehrere Ehrendoktorwürden, unter anderem an der Harvard Universität (Wikipedia (2015b)). Laut Weltgesundheitsorganisation waren im Februar 2014 über 5% der Bevölkerung weltweit hörgeschädigt<sup>1</sup> (Weltgesundheitsorganisation (WHO) (2015)). Das entspricht einer Zahl von circa 360 Millionen Menschen.

Hörschädigungen können im Allgemeinen in vier Kategorien eingeteilt werden: Bei Schädigungen des Außen- und/oder des Mittelohres, aufgrund derer der Schall nicht zum Innenohr weitergeleitet werden kann, spricht man von einer Schallleitungsschwerhörigkeit. Die Schallempfindungsschwerhörigkeit, von der auch Helen Keller betroffen war, wird in der Regel durch fehlende oder beschädigte Sinneszellen in der Cochlear (Hörschnecke im Innenohr) verursacht. Das heißt, dass der Schall zwar am ovalen Fenster, dem Übergang vom Mittelohr zum Innenohr ankommt, die Übertragung zum Hörnerv jedoch nicht funktioniert. Diese zwei Arten von Hörschädigung können auch

---

<sup>1</sup>Definition von „hörgeschädigt“ in dieser Statistik: Hörverlust von über 40dB des besseren Ohres bei Erwachsenen bzw. Hörverlust von über 30dB des besseren Ohres bei Kindern.

gleichzeitig auftreten. Dabei spricht man von einer kombinierten Schwerhörigkeit. Als letzter Punkt in der Kette der Schall- beziehungsweise Reizweiterleitung kann auch der Hörnerv geschädigt sein oder fehlen, was eine neurale Hörschädigung zur Folge hat.

Durch den heutigen Stand der Technik sind Hörgeschädigte im Vergleich zu Helen Keller in der Regel nicht mehr auf Gebärdensprache, Fingeralphabete und Ähnliches angewiesen, sondern können je nach Hörschädigung durch verschiedene Hörhilfen einen großen Teil ihres Hörvermögens wiedererlangen. Bei einer Schallleitungsschwerhörigkeit zum Beispiel wird der Patient in der Regel mit einem Hörgerät versorgt. Sogar bei einem fehlenden Hörnerv, kann einem Patienten durch ein Hirnstammimplantat (Auditory Brainstem Implant, ABI) geholfen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Sprachproduktion von Hörgeschädigten untersucht werden, die von einer Schallempfindungsschwerhörigkeit betroffen sind und mit einem Cochlear Implantat (CI) versorgt wurden. Ein Cochlear Implantat ist eine Hörprothese, die die geschädigten Teile des Innenohres umgeht und die Nervenfasern im Innenohr direkt durch elektrische Impulse stimuliert. Die ersten Versorgungen mit einem Cochlear Implantat wurden Ende der siebziger Jahre in Australien und in Österreich durchgeführt (Wikipedia (2015a) und MED-EL Elektromedizinische Geräte Gesellschaft m.b.H. (b)). Laut der Deutschen Cochlear Implant Gesellschaft (DCIG) gab es zu Beginn dieses Jahres weltweit circa 450 000 CI-Träger (Deutsche Cochlear Implant Gesellschaft (DCIG) (a), Stand: Januar 2015), davon circa 35 000 in Deutschland (Deutsche Cochlear Implant Gesellschaft (DCIG) (b), Stand: Februar 2015). Für ein besseres Verständnis der vorliegenden Arbeit soll im folgenden Abschnitt näher auf die Technik und die Funktionsweise eines Cochlear Implantats eingegangen werden.

## 1.1 Technik und Funktionsweise eines Cochlear Implantats

Ein Cochlear Implantat besteht aus zwei Teilen, einer externen und einer internen Komponente (siehe Abbildung 1.1). Die externe Komponente ist abnehmbar und wird hinter dem Ohr getragen. Im Gegensatz dazu ist die interne Komponente, das eigentliche Implantat, nach außen hin nicht sichtbar.

## Externe Komponente

Die externe Komponente eines Cochlear Implantats ist in Abbildung 1.1 (a) dargestellt. Sie besteht wiederum aus zwei Teilen: Der erste, der hinter dem Ohr getragen wird, in Abbildung 1.2 mit der Nummer 1 gekennzeichnet, besteht aus mindestens einem Mikrofon mit Richtcharakteristik, das Schallsignale aufnimmt, dem Sprachprozessor, der die Signale in ein Muster von elektrischen Impulsen umwandelt und einer Batterie für die Energieversorgung des gesamten Systems.

Der zweite Teil der externen Komponente ist die Sendespule (siehe Abbildung 1.2 Nummer 2), die über ein Kabel mit dem Sprachprozessor verbunden ist und auf diesem Weg das elektrische Stimulationsmuster empfängt. Die Sendespule beinhaltet außerdem einen Permanentmagneten, dessen Gegenstück unter der Haut liegt. Somit kann die externe Komponente eines Cochlear Implantats jederzeit abgenommen werden. Weiterhin erfolgt an dieser Schnittstelle die Energieversorgung des Implantats über Induktion durch die Kopfhaut.



(a) externe Komponente



(b) interne Komponente

Abbildung 1.1: Externe (a) und interne (b) Komponente eines Cochlear Implantats. (Quelle: MED-EL Elektromedizinische Geräte Gesellschaft m.b.H. (a))

## Interne Komponente

Die interne Komponente des Cochlear Implantats besteht wie in Abbildung 1.1 (b) zu sehen ist, ebenfalls aus zwei Teilen: der Empfängerspule und dem Elektrodenträger. Die Empfängerspule (siehe Abbildung 1.2 Nummer 3) enthält zum einen den Permanentmagneten, zum anderen empfängt sie über induktive Kopplung durch die Haut das elektrische Stimulationsmuster des Sprachprozessors. Dieses wird an den zweiten Teil der internen Komponente, den Elektrodenträger (siehe Abbildung 1.2 Nummer 4) weitergeleitet. Der Elektrodenträger weist je nach Hersteller bis zu 22 Elektrodenkontakte auf.

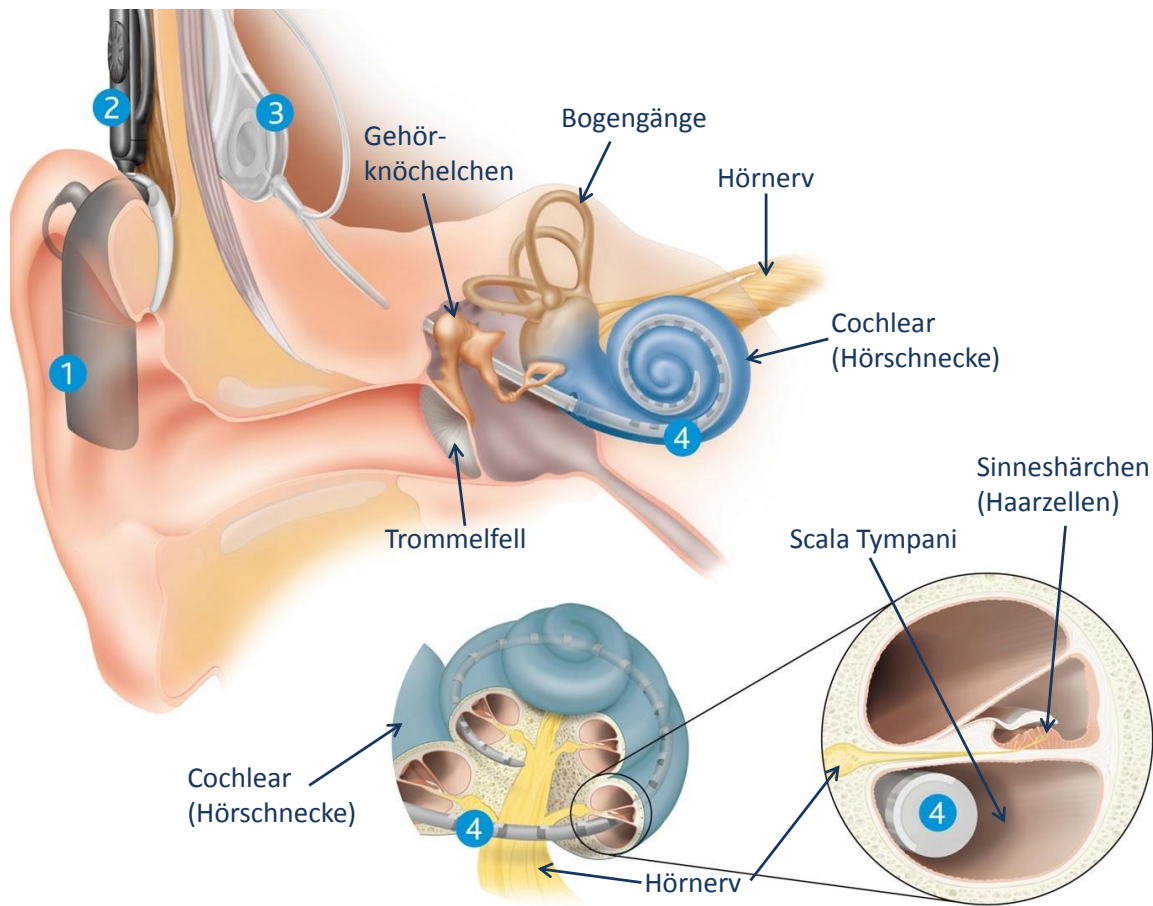


Abbildung 1.2: Lage der einzelnen Komponenten eines Cochlear Implantats (oben). Lage des Elektroden-Trägers in der Cochlear (unten). (1): Sprachprozessor / (2): Sendespule / (3): Empfänger/Stimulator / (4): Elektroden-Träger. (Abbildung von Cochlear Deutschland GmbH & Co. KG (2015) übernommen und ergänzt)

### Funktionsweise eines Cochlear Implantats

Beim natürlichen Hören gelangen Schallwellen durch den Gehörgang zum Trommelfell. Dort werden die Schwingungen in mechanische Energie umgewandelt und im Mittelohr über die Gehörknöchelchen zum ovalen Fenster übertragen. Die Schwingungen des ovalen Fensters lösen in der mit Lymphe gefüllten Scala Tympani eine sogenannte Wanderwelle aus. Aufgrund der Eigenschaften der elastischen Membranen in der Cochlear erreicht die Wanderwelle an der zu stimulierenden Frequenz ihren Höhepunkt und bricht dann zusammen, wobei die höchsten Frequenzen am ovalen Fenster stimuliert werden, die tiefsten an der Schneckenspitze. Am höchsten Punkt der Wanderwelle werden kleine Sinneshaärchen (beziehungsweise Haarzellen) stimuliert, die aufgrund dessen einen Reiz an den Hörnerv weitergeben.

Bei einer Schallempfindungsschwerhörigkeit sind diese Sinnes- oder Haarzellen entweder beschädigt oder fehlen. Deshalb muss deren Funktion, die Reizweiterleitung zum Hörnerv, durch ein Cochlear Implantat ersetzt werden. Das funktioniert folgendermaßen:

Ein Schallsignal wird vom Mikrofon empfangen, anschließend verstärkt, analog vorverarbeitet und in ein digitales Signal umgewandelt. Je nach Kodierungsstrategie wandelt der Sprachprozessor dieses digitale Signal in ein Muster von elektrischen Reizimpulsen um. Dieses Stimulationsmuster von elektrischen Impulsen ist „eine für die zentrale auditorische Verarbeitung verwertbare Folge von Aktionspotentialen“ (Kramme (2007)).

Der Elektrodenträger liegt, wie in Abbildung 1.2 unten zu sehen ist, in der Scala Tympani. Auf ihm sind entsprechend der tonotopen Organisation der Cochlear die Elektroden aufgereiht. Bei der Ansteuerung einer Elektrode werden jeweils die in deren Feld liegenden Nervenendungen des Hörnervs stimuliert. Jede dieser Elektroden stimuliert somit ein Frequenzband, wobei die Breite der Frequenzbänder ebenso wie die Höhe der Frequenzen vom ovalen Fenster zur Spitze hin nach einer logarithmischen Skala abnimmt. Auf diese Art wird die natürliche Frequenz-Orts-Transformation simuliert. Die Zeitstruktur des Sprachsignals wird durch die Pulsfolge der Stimulation übersetzt. Durch die Anzahl der Aktionspotentiale wird der subjektive Eindruck der Lautstärke gesteuert (Kramme (2007) und Wintermantel & Ha (2008)).

## 1.2 Motivation & Zielsetzung

Die im vorangehenden Kapitel beschriebene Technik und Funktionsweise eines Cochlear Implantats weist im Vergleich zum gesunden Gehör natürlich gewisse Einschränkungen auf. Zum einen kann die Anzahl der Elektroden nicht beliebig gesteigert werden, da sich die stimulierten Frequenzbänder sonst zu stark überschneiden und gegenseitig stören würden. Das resultiert in einer schlechteren spektralen Auflösung, vor allem in den oberen Frequenzbereichen. Zum anderen ist auch die zeitliche Auflösung beschränkt, da die Pulse aufgrund der Refraktärzeit der Nervenendungen nicht beliebig kurz aufeinander folgen können. Aus diesen Einschränkungen kann geschlossen werden, dass CI-Träger sowohl die eigene Sprachproduktion als auch die anderer Sprecher nicht in der Qualität wahrnehmen können wie normal hörende Sprecher.

Da davon ausgegangen werden kann, dass ein CI-Träger nur die Laute beziehungsweise Unterschiede zwischen Lauten produzieren kann, die er auch wahrnehmen kann, ist die Sprachproduktion von CI-Trägern in vielerlei Hinsicht ein interessanter und wich-

tiger Untersuchungsgegenstand. Zum einen sind die Ergebnisse einer Untersuchung der Sprachproduktion von CI-Trägern wichtig für die Weiterentwicklung von Cochlear Implantaten. Zum anderen ist dieser Ansatz vor allem für die sprachtherapeutische Betreuung von CI-Trägern relevant, da es immer technische Einschränkungen geben wird. Hier wäre es zum Beispiel vorstellbar, gezielter an der besseren Differenzierung von zwei Sprachlauten, wie /s/ und /S/<sup>2</sup>, zu arbeiten. Da CI-Träger diese zwei Phoneme schlechter unterscheiden können, differenzieren sie in deren Produktion nicht in dem Maß wie normal Hörende (Uchanski & Geers (2003), Liker et al. (2007), Mildner & Liker (2008), Todd et al. (2011)).

Ein Blick auf die bisher veröffentlichte Literatur zu akustisch-phonetischen Studien der Sprachproduktion von CI-Trägern ergibt, dass sich die Ergebnisse bei ähnlicher Vorgehensweise oft sehr stark unterscheiden. Vor allem bei der Analyse der Vokalproduktion ist das sehr auffallend (siehe zum Beispiel Perkell (1992), Liker et al. (2007) und Neumeier et al. (2010)). Ein Ziel dieser Arbeit ist zu untersuchen, warum das der Fall ist. Die Vorgehensweise ist folgendermaßen: CI-Träger werden in dieser Arbeit nicht als homogene Patientengruppe betrachtet, sondern im Hinblick auf zwei Faktoren in getrennten Sprechergruppen analysiert und mit jeweils einer eigenen Kontrollgruppe verglichen. Der erste Faktor ist, ob CI-Träger prälingual, also vor Spracherwerb, oder postlingual, nach Spracherwerb, ertaubten. Der Gedanke dahinter ist, dass es einen wesentlichen Unterschied macht, ob jemand mit uneingeschränkter Hörfähigkeit Sprechen gelernt hat, oder ob ihm während des Spracherwerbs kein beziehungsweise nur ein stark eingeschränktes Hörvermögen zur Verfügung stand. In den meisten Studien werden entweder nur prä- oder postlingual ertaubte Sprecher untersucht oder gar nicht zwischen prä- und postlingual ertaubten CI-Trägern differenziert. Da es sich jedoch immer um unterschiedliche Studien handelt, sind die Ergebnisse nicht gänzlich vergleichbar. In dieser Studie ist das methodische Vorgehen für prä- und postlingual ertaubte CI-Träger genau gleich und beide Gruppen werden jeweils mit einer in Alter und Geschlecht passenden Kontrollgruppe verglichen. Das heißt, die Ergebnisse für die prä- und postlingual ertaubten CI-Träger können sowohl verglichen werden als auch eventuell einen Beitrag dazu leisten, die konträren Ergebnisse bisheriger Studien zu verstehen.

---

<sup>2</sup>In dieser Arbeit werden SAMPA-Symbole verwendet. SAMPA = Phonetisches Alphabet, das auf der Zeichenkodierung American Standard Code for Information Interchange (ASCII) basiert (Wells (1997)).

Wie im vorangehenden Absatz bereits erwähnt, wurden die Sprechergruppen noch weiter untergliedert. Der zweite Faktor für die Gruppeneinteilung ist die Dauer zwischen der Ertaubung und der CI-Versorgung. Dieses Vorgehen berücksichtigt bei postlingual ertaubten Sprechern eventuelle Veränderungen der Sprachproduktion während der Zeit, in der ihnen kein auditorisches Feedback zur Verfügung stand. Es ist anzunehmen, dass sich die Sprachproduktion stärker verändert, umso länger die CI-Träger ihre eigene Sprachproduktion nicht wahrnehmen konnten (Menard et al. (2007)). Bei den prälingual ertaubten Sprechern wird bei dieser Einteilung davon ausgegangen, dass es einen wesentlichen Unterschied macht, ob ein CI-Träger während der regulären Spracherwerbsphase kein auditorisches Feedback zur Verfügung hatte oder ob er mit Hilfe eines Cochlear Implantats hören und somit mit auditorischem Feedback Sprechen lernen konnte. Diese Vorgehensweise der getrennten Betrachtung verschiedener Sprechergruppen innerhalb einer Studie soll dazu beitragen, ein besseres Verständnis der Sprachproduktion von CI-Trägern zu erlangen.

Da davon ausgegangen werden kann, dass sich die Sprachproduktion von CI-Trägern innerhalb des ersten Jahres nach der Aktivierung noch stark verändert, wird nur die Sprachproduktion von CI-Trägern ab einem Jahr CI-Tragedauer mit der normal hörender Kontrollgruppensprecher verglichen. Da aber gerade die Entwicklung nach einer CI-Versorgung interessant ist, wird noch eine zusätzliche Langzeitstudie durchgeführt. Der Langzeitstudie liegt dasselbe methodische Vorgehen wie der anderen Studie zugrunde. Die CI-Träger werden jedoch nicht mit Kontrollgruppensprechern verglichen, sondern es wird ein Vergleich zwischen Aufnahmen der einzelnen Sprecher von vor der Aktivierung des Sprachprozessors, 1 Monat, 3 Monate, 6 Monate und ein Jahr danach erstellt.

Weiterhin lässt sich mit Blick auf die Literatur zu akustisch-phonetischen Analysen der Sprachproduktion von CI-Trägern feststellen, dass es bisher kaum Untersuchungen über deutschsprachige CI-Träger gibt. Dabei ist gerade das deutsche Vokalsystem aufgrund seiner großen Anzahl von Vokalen und deren Verteilung im Vokalraum sehr gut geeignet, um die Vokalartikulation von CI-Trägern zu untersuchen, da es vielseitigere Möglichkeiten bietet als dies bei anderen Sprachen der Fall ist. Dadurch, dass es im deutschen Vokalsystem vordere gerundete Vokale gibt, was in der am häufigsten untersuchten Sprache, dem Englischen, nicht der Fall ist, sind zum Beispiel Untersuchungen von Kontrasten gezielt im Hinblick auf verschiedene Merkmale der Vokalartikulation, wie Zungenlage oder Lippenrundung, möglich. Auch die Analyse von komplexen Zeitstrukturen ist im Deutschen anhand von Lautverbindungen, bestehend aus mehreren Konsonanten (Konsonantencluster), wie /Spr/ oder /Str/ sehr gut realisierbar.



Insgesamt ist das Ziel dieser Arbeit, einen möglichst großen Überblick über die Sprachproduktion von deutschen CI-Trägern zu gewinnen. Deshalb wurde neben der Einteilung der CI-Träger in verschiedene Sprechergruppen darauf geachtet, den Fokus der einzelnen Analysen auf möglichst unterschiedliche Untersuchungsgegenstände zu legen. Als erstes wurden aus oben genannten Gründen Vokale ausgewählt. Sie sind außerdem eine Lautklasse, deren relevante Frequenzen sich vorrangig in einem niedrigeren Frequenzbereich befinden. Der zweite Untersuchungsgegenstand sind die Sibilanten, da sich zum einen deren relevanter Frequenzbereich stark von dem der Vokale unterscheidet. Zum anderen sind sie artikulatorisch komplex und stellen somit sowohl in der Produktion als auch in der Perzeption höhere Ansprüche an die Leistungsfähigkeit des Sprechers beziehungsweise des Hörers. Der dritte Untersuchungsgegenstand, die Gruppe der Lautverbindungen (Konsonantencluster), dient als Untersuchungsgegenstand für motorisch komplexe Sprachproduktion. Konsonantencluster sind sehr gut dafür geeignet, die Koordinationsfähigkeit bei zeitlich komplexen Abläufen auf subsilbischer Ebene zu untersuchen. Im Hinblick auf die vorangehenden Vokal- und Sibilantenanalysen soll bei den Konsonantenclustern ein Schwerpunkt auf einen Sibilanten innerhalb des Clusters und den auf den Cluster folgenden Vokal gelegt werden.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut: Im Anschluss an diese Einleitung folgt ein Methoden-Kapitel (Kapitel 2), das die der ganzen Arbeit zugrunde liegende Vorgehensweise beschreibt und vor allem zu Beginn noch einmal genauer auf die soeben hervorgehobene Gruppeneinteilung eingeht. Das Kapitel 3 beinhaltet die erste der drei Untersuchungen: die Vokalanalyse. Anschließend folgt ein Kapitel mit der Analyse der Produktion von Sibilanten (Kapitel 4) und die Analyse der Zeitstruktur in komplexen Phonemkombinationen (Kapitel 5). Diese drei Forschungskapitel sind alle gleich aufgebaut: Einleitend wird ein Überblick über die Motivation für die jeweilige Untersuchung, die vorhandene Literatur und die im Zusammenhang damit der Untersuchung zugrunde liegenden Hypothesen gegeben. Darauf folgt der Vergleich der einzelnen Gruppen von CI-Trägern (ab einem Jahr CI-Tragedauer) mit den jeweiligen Kontrollgruppen. Abgeschlossen werden die Kapitel jeweils durch die Langzeitstudien. Zusätzlich zu den Diskussionen der Ergebnisse in den einzelnen Kapiteln werden alle Ergebnisse dieser Arbeit im letzten Abschnitt (Kapitel 6) noch einmal im Gesamtzusammenhang diskutiert.

# Kapitel 2

## Methode

In diesem Kapitel wird die Methode beschrieben, die allen Einzelstudien dieser Arbeit - drei Vergleiche zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern und drei Langzeitstudien - als Grundlage dient. Als Erstes wird die Auswahl der Sprecher und deren Einteilung in verschiedene Gruppen beschrieben (Kapitel 2.1). In Kapitel 2.2 wird der Aufbau des Sprachmaterials erläutert. Im Anschluss (Kapitel 2.3) erfolgt eine Ausführung über die Erhebung der Sprachdaten und die dafür verwendete technische Ausrüstung. Im Kapitel Datenbearbeitung (Kapitel 2.4) sind die Arbeitsschritte aufgeführt, die für alle Einzelstudien grundlegend sind.

### 2.1 Sprecher und Gruppeneinteilung

CI-Träger bilden aufgrund der unterschiedlichen Ursachen für eine Ertaubung und sehr individueller Krankheitsverläufe keine homogene Sprechergruppe. Deswegen sind sie im Folgenden in vier verschiedene Sprechergruppen eingeteilt. Ausschlaggebend für diese Aufteilung sind die Faktoren Alter bei der Ertaubung, Dauer von der Ertaubung bis zur CI-Versorgung und vor allem, ob ein CI-Träger vor der Ertaubung Sprache mit einem gesunden, uneingeschränkten Hörvermögen wahrnehmen konnte. Auf den Grad der Ertaubung nach der CI-Versorgung muss hier keine Rücksicht genommen werden, da dann (außer bei einer EAS-Versorgung (= Elektrisch Akustische Stimulation)) kein verwertbares Resthören mehr vorhanden ist. Auf den Grad und die Art der Ertaubung vor der CI-Versorgung, ob sie progredient verlaufen oder plötzlich eingetreten ist, kann hier aufgrund der zu kleinen Sprecherzahl und vor allem der zu großen individuellen Unterschiede nicht eingegangen werden. Gleiches gilt für das CI-Modell und die Kodierungsstrategie.

Das Hauptkriterium bei der Gruppeneinteilung ist das Alter bei Eintreten der Ertaubung. Ausschlaggebend ist, ob ein CI-Träger von Geburt an gehörlos ist beziehungsweise kurz danach ertaubt ist, oder ob der Hörverlust erst nach dem Kleinkindalter eintrat. Im ersten Fall verfügte er bereits während des Spracherwerbs nur über ein eingeschränktes auditorisches Feedback, im zweiten konnte er während des ganzen oder zumindest eines großen und wichtigen Teils des Spracherwerbs von einem uneingeschränkten Hörvermögen profitieren. Dieses Vorgehen ist dadurch begründet, dass es nicht nur für die Hörfähigkeit, sondern auch für die Artikulation eine wesentliche Rolle spielt, auf welchem Weg ein CI-Träger Sprechen und Sprachverstehen gelernt hat. Nach der Theorie des DIVA (Directions Into Velocities of Articulators) Modells (siehe Abbildung 2.1) von Guenther (Guenther (1995), Guenther et al. (1998), Guenther et al. (2006), Guenther (2006)) existiert im linken Operculum frontale eine „Speech Sound Map“. Das linke Operculum frontale ist eine Gehirnregion, in der Repräsentationen aller Sprachlaute gespeichert werden. Im Falle einer angeborenen Hörschädigung ist diese „Speech Sound Map“ eingeschränkt, da nur die Laute vorhanden sein können, die auch gehört werden können. Die „Speech Sound Map“ ist wichtig, da sie beim Sprechvorgang ständig mit der „Auditory State Map“ und der „Somatosensory State Map“ verglichen wird, also dem akustischen und dem somatosensorischen „Ist-Zustand“. Eventuelle Unterschiede zwischen dem „Soll“ („Speech Sound Map“) und dem „Ist“ werden in auditorischen und somatosensorischen „Error Maps“ registriert und die Artikulationsgeschwindigkeit und Position der Artikulatoren („Articulatory Velocity and Position Maps“ (Motor Cortex)) dementsprechend korrigiert.

Diese Tatsache führt zum zweiten Faktor, nach welchem die Gruppeneinteilung vorgenommen wird, nämlich wie lange die Ertaubung des CI-Trägers vor der Versorgung derart gravierend war, dass kein Sprachverstehen mehr möglich war. Der Grund für diese Einteilung ist, dass die Artikulation während des Sprechvorgangs ständig über die im vorangehenden Absatz beschriebene auditorische und somatosensorische Feedbackschleife, also den Vergleich zwischen dem „Soll-Zustand“ und dem „Ist-Zustand“, kontrolliert wird. Wenn es keine (unbeeinträchtigte) auditorische Rückmeldung mehr gibt, werden Abweichungen zwischen dem Sprachlaut, der produziert werden soll, und dessen Repräsentation in der „Speech Sound Map“ nicht mehr durch die „Error Maps“ erkannt und somit auch nicht mehr korrigiert. Das führt bei Hörgeschädigten mit der Zeit zu einer immer ungenaueren Artikulation (Menard et al. (2007)).

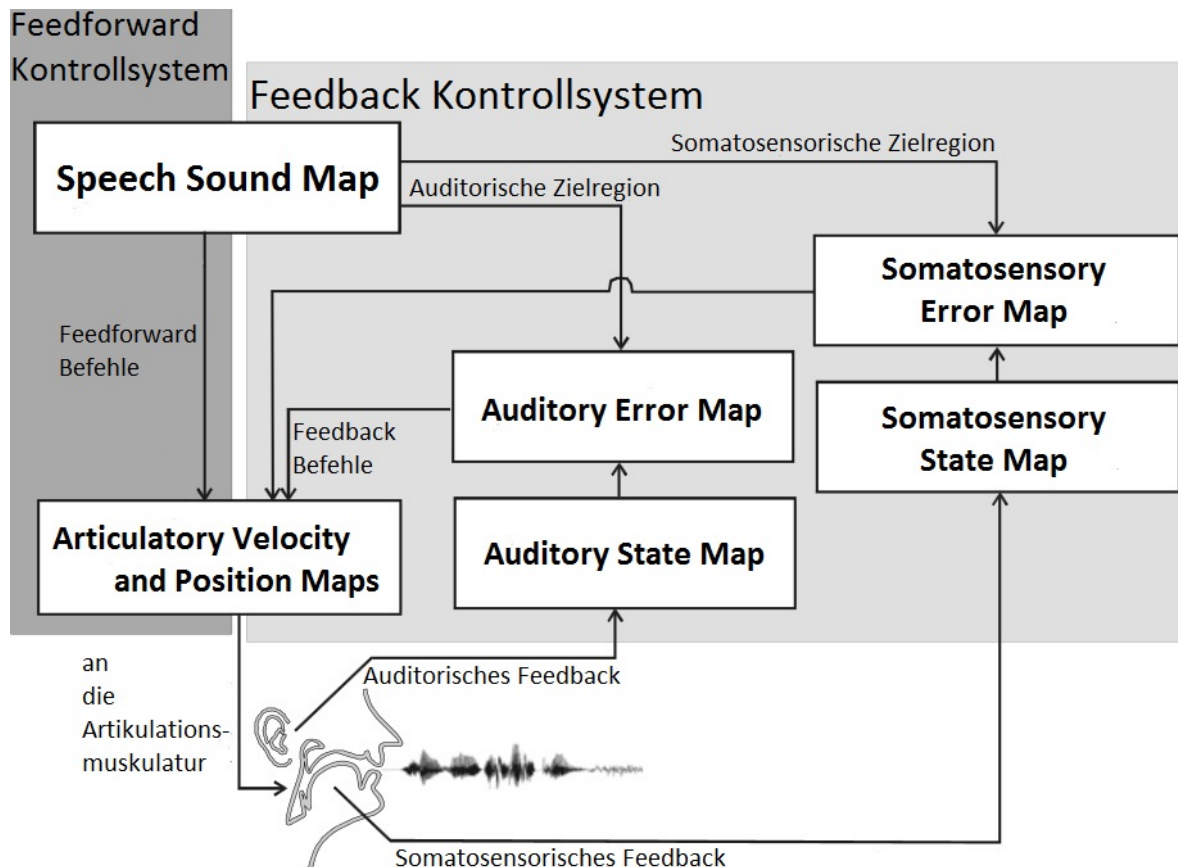


Abbildung 2.1: Übersicht über das DIVA-Modell. (Modell aus Guenther et al. (2006) vereinfacht und teilweise ins Deutsche übersetzt.)

Aufgrund der soeben geschilderten Kriterien gestaltet sich die Einteilung der CI-Träger in Gruppen wie folgt:

- CI\_1: Von Geburt an gehörlose beziehungsweise kurz danach ertaubte CI-Träger, die zeitnah nach Ertaubung (innerhalb von zwei Jahren) mit einem CI versorgt wurden (Spracherwerbsphase mit CI)
- CI\_2: Von Geburt an gehörlose beziehungsweise kurz danach ertaubte CI-Träger, die erst nach Jahren mit einem CI versorgt wurden (stark beeinträchtigte Spracherwerbsphase)
- CI\_3: Nach Kleinkindalter ( $> 4$  Jahre) ertaubte und zeitnah nach Ertaubung (innerhalb von zwei Jahren) mit CI versorgte CI-Träger (unbeeinträchtigte Spracherwerbsphase)
- CI\_4: Nach Kleinkindalter ( $> 4$  Jahre) ertaubte und erst nach  $> 2$  Jahren mit CI versorgte CI-Träger (unbeeinträchtigte Spracherwerbsphase)

Zu jedem CI-Träger wurde ein in Alter und Geschlecht passender Kontrollgruppensprecher aufgenommen. Die Kontrollgruppensprecher wurden in vier Sprechergruppen eingeteilt, die dieselbe Alters- und Geschlechtsverteilung haben wie die vier CI-Gruppen.

## 2.2 Sprachmaterial

Das Sprachmaterial besteht aus zweisilbigen Wörtern, die satzmedial in einen Trägersatz eingebettet sind, wobei die Satzbetonung immer auf dem Zielwort liegt. Die Vokale, Konsonanten und die zwei Clusterreihen sind je nach Gruppe in einen eigenen Trägersatz eingebettet. Es wurde nicht für jedes Zielwort ein eigener Satz gewählt, da derselbe Trägersatz eine konstant gleiche Satzbetonung für jede Lautgruppe gewährleistet. Durch die Verwendung der vier verschiedenen Trägersätze soll die Konzentration der Versuchspersonen besser aufrechterhalten bleiben, um die Fehlerquote möglichst gering zu halten.

Insgesamt liest jede Versuchsperson sieben Zielwörter mit Vokalen, sechs mit Konsonanten und zwei Clusterreihen (= /Str/-Reihe: sechs Wörter + /kn, kl/-Reihe: fünf Wörter = elf Zielwörter). Da jede Äußerung sechs mal wiederholt wird, spricht jeder Proband insgesamt 144 Sätze, die in randomisierter Reihenfolge präsentiert werden. Eine Übersicht des gesamten Sprachmaterials befindet sich in Anhang (A).

Während der Studie entstand eine Kooperation mit der Audiologie, Phoniatrie und Pädaudiologie in der Klinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde am Klinikum Großhadern in München. Im Zuge dieser Zusammenarbeit wurde das Sprachmaterial erweitert. Auf das zusätzliche Sprachmaterial soll hier nicht weiter eingegangen werden, weil es nicht von allen Sprechern gelesen wurde und für die weitere Auswertung keine Rolle spielt. Der gerade beschriebene Teil des Sprachmaterials und die zwei weiteren Blöcke wurden jeweils durch Pausen getrennt aufgenommen. Die zusätzlichen Sätze haben keinen Einfluss auf die Aufnahme des hier relevanten Sprachmaterials, da dieser Block immer als erstes aufgenommen wurde. Die einzige Änderung ist, dass aufgrund der Menge des hinzugefügten Sprachmaterials jeder Satz nur noch fünf Mal wiederholt wurde. Die Aufnahmen aus dieser Zusammenarbeit wurden im Rahmen der Langzeitstudie ausgewertet.

## 2.3 Datenerhebung

In der ersten Phase des Projekts wurden die CI-Träger in einem schallarmen Raum im Tonstudio des Instituts für Phonetik und Sprachverarbeitung (IPS) in München aufgenommen. Die Aufnahmen der zweiten Projektphase (Langzeitstudie) wurden in einem schallarmen Audiologieraum am Klinikum Großhadern durchgeführt. Die Aufnahmen mit den Kontrollgruppensprechern fanden ausschließlich am IPS statt.

Vor der Aufnahme wurde von jeder Versuchsperson ein Fragebogen zur Erhebung von Metadaten wie Alter, Geschlecht und dem Bundesland, in dem die Grundschule besucht wurde, ausgefüllt. Der Fragebogen für die CI-Träger beinhaltet zusätzlich noch weitere Faktoren wie CI-Tragedauer, Art der CI-Versorgung, CI-Modell und Art und Dauer der Hörbeeinträchtigung.

Die Aufnahmen wurden mit der am IPS für Sprachaufnahmen entwickelten Software SpeechRecorder (Draxler & Jänsch (2004)) durchgeführt. Bei den Aufnahmen wurde sowohl ein Beyerdynamic Opus 54.16/3 Headset, als auch ein Großmembran-Mikrofon Neumann TLM 103 verwendet. Das Großmembran-Mikrofon ist in einer elastischen Aufhängung an einem höhenverstellbaren Stativ angebracht. In Großhadern wurde stattdessen das Mikrofon Audio Technica AT3031 verwendet. Die von den Versuchspersonen gesprochenen Sätze wurden auf zwei Kanälen (Stereo) mit einer Sample-Rate von 44,1kHz aufgenommen. Die Quantisierung wurde auf 16Bit linear eingestellt. Für die Analyse wurden nur die Headset-Aufnahmen verwendet, der zweite Kanal wurde als Backup aufgenommen.

## 2.4 Datenbearbeitung

Die einzelnen Arbeitsschritte der Datenbearbeitung und die dafür verwendete Software sind in der Übersicht in Abbildung 2.2 dargestellt.

Nach der Aufnahme mit SpeechRecorder wurden auf Basis der wav-Dateien (eine pro Äußerung) und den zugehörigen vorhandenen orthographischen Repräsentationen mit MAUS (Münchner AUtomatische Segmentierungen (Schiel (1999))) automatisch phonetische Segmentierungen erzeugt und in TextGrid-Dateien zur Weiterverarbeitung in Praat (Boersma & Weenink (2001)) gespeichert. Die TextGrids wurden mit drei Ebenen für Orthographie (ORT), kanonische Aussprache (KAN) und einzelne Lautsegmente (MAU) erstellt.

Verschriftet wurde im Hinblick auf die weitere Verarbeitung mit SAMPA-Symbolen Wells (1997). Die vorsegmentierten Daten wurden mit Praat manuell nachkorrigiert.

Nach der Segmentierung der Daten wurde mit dem EMU Speech Database System (Harrington (2010)) eine Datenbank mit allen Äußerungen der Versuchspersonen erstellt. Weitere Arbeitsschritte, die nur für die Auswertung der einzelnen Parameter erforderlich sind, werden in den jeweiligen Methodenteilen beschrieben. Die Auswertung, die Abbildungen und die Statistik wurden mit R (Team R Core (2014)) erstellt.

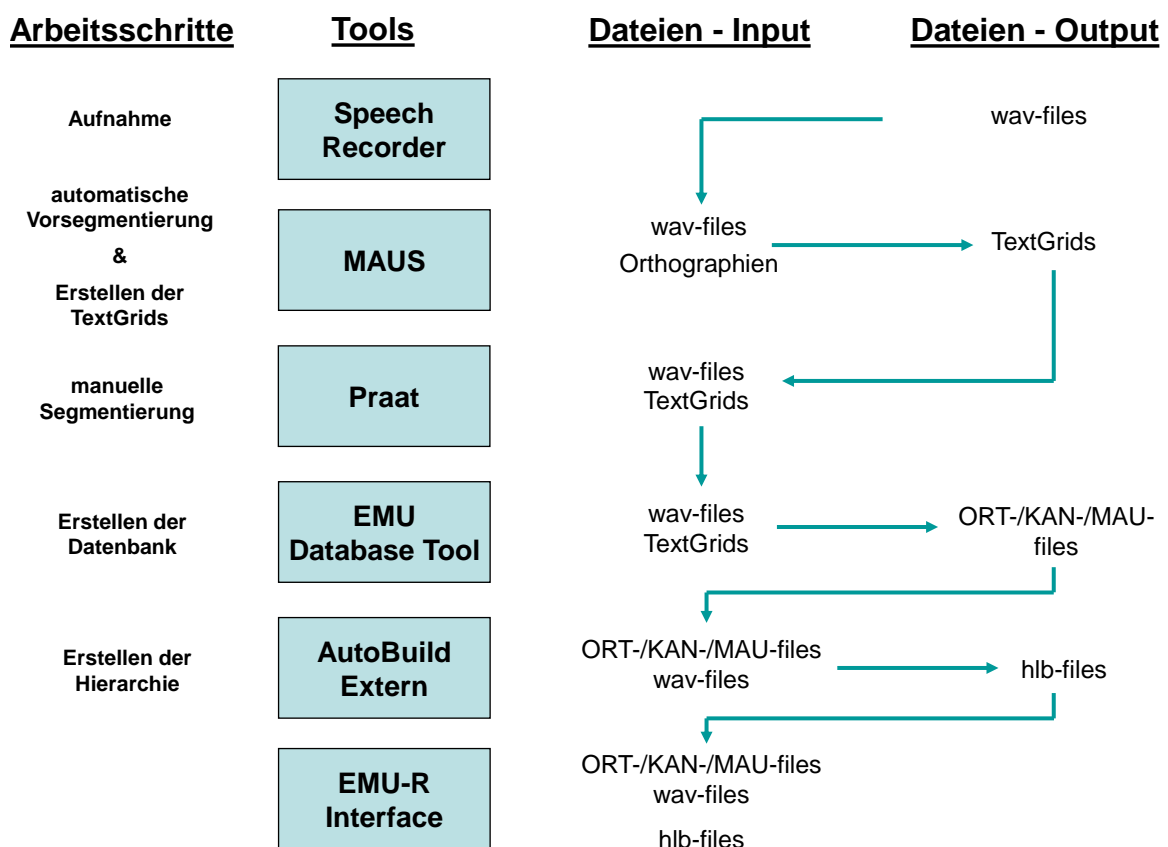


Abbildung 2.2: Übersicht über die für die Datenverarbeitung verwendeten Tools und die jeweiligen Arbeitsschritte.

# Kapitel 3

## Vokalanalyse

Das folgende Kapitel beinhaltet zwei Studien über die Vokalproduktion von CI-Trägern. Einleitend wird ein Überblick über die bereits vorhandene Literatur und die daraus resultierenden Hypothesen für diese Untersuchungen gegeben (Kapitel 3.1). In der ersten der beiden Studien wird die Artikulation von CI-Trägern mit der von normal hörenden Kontrollgruppensprechern verglichen (Kapitel 3.2). Gegenstand der zweiten Studie dieses Kapitels ist die Entwicklung der Vokalproduktion von CI-Trägern von vor Aktivierung des Sprachprozessors bis einschließlich ein Jahr danach (Kapitel 3.3).

### 3.1 Motivation und Forschungsfragen

Ein typisches Merkmal für die Sprache von Hörgeschädigten ist, dass die Vokale eher „verwaschen“ klingen (Leonhardt (2002), S.77f). Nach dem in Kapitel 2.1 beschriebenen DIVA-Modell von Guenther (Guenther (1995), Guenther et al. (1998), Guenther et al. (2006), Guenther (2006)) ist der Grund für die mangelnde Präzision in der Sprachproduktion, dass die Selbstkontrolle und -korrektur bei der Sprachproduktion durch das eingeschränkte Feedback oft nur wenig bis gar nicht möglich ist. Nach einer Versorgung mit einem Cochlear Implantat können CI-Träger (wieder) ein besseres, wenn auch nach wie vor unvollständiges auditorisches Feedback wahrnehmen. Die Kontrolle und auch Korrektur der eigenen Sprachproduktion ist dann wieder möglich. Der Bezug der eigenen Sprachwahrnehmung zur Artikulation muss jedoch erst wieder neu erlernt werden, genauso wie sich die Repräsentationen der einzelnen Laute in der „Speech Sound Map“ erst bilden beziehungsweise voneinander abgrenzen müssen.



Im Laufe dieses Lernprozesses unterscheiden sich die einzelnen Vokalklassen dann immer deutlicher. Im Folgenden soll auf mehrere Langzeitstudien eingegangen werden, die diese Entwicklung genauer untersucht haben.

Perkell (1992) hat in seiner Studie vier CI-Träger (drei von vier postlingual ertaubt) vor der CI-Versorgung, zum Zeitpunkt der Aktivierung und einen, drei, sechs und zwölf Monate nach Aktivierung des Sprachprozessors untersucht. Gegenstand der Untersuchung waren (unter anderem) der erste und zweite Formant und die Dauern von neun amerikanisch-englischen Vokalen. Zusätzlich zu dem in Langzeitstudien üblichen Vergleich des Datenmaterials der einzelnen Sitzungen innerhalb eines Sprechers wurden die Ergebnisse Werten normal Hörender (NH) aus einer Studie von Peterson & Barney (1952) gegenübergestellt. In den Ergebnissen ist ein klarer Trend für F1 erkennbar: Der erste Formant sank von prä- zu post-Aktivierung und auch in den späteren Aufnahmen für alle CI-Träger. Die Werte entfernten sich somit kontinuierlich von den NH-Werten. Für F2 ist jedoch keine definierbare Tendenz zu erkennen. Die Dauern wurden über den Untersuchungszeitraum konstant bei allen vier Versuchspersonen kürzer.

In einer Studie von 2003 haben Schenk et al. (2003) zehn postlingual ertaubte CI-Träger (fünf weiblich / fünf männlich) vor der CI-Versorgung sowie drei Monate und ein Jahr nach Aktivierung des Sprachprozessors untersucht. Gegenstand waren die deutschen Vokale /e, a, o/ aus „Nordwind und Sonne“. Ihr Ergebnis ist konsistent mit dem von Perkell (1992): Über den gesamten Untersuchungszeitraum sank F1 und für F2 wurden keine signifikanten Veränderungen gemessen. Der Vokalraum der männlichen Sprecher wurde innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung signifikant größer, bei den Frauen gab es keine signifikanten Veränderungen.

Die Ergebnisse der gerade beschriebenen Studien stehen im Gegensatz zu den Resultaten von Liker et al. (2007). In dieser Langzeitstudie wurden 18 Kinder (vor allem prälingual ertaubte) innerhalb von 20 Monaten drei Mal aufgenommen (kein Vergleich prä- vs. post-CI-Versorgung) und die Werte wurden zusätzlich noch mit einer in Alter und Geschlecht passenden Kontrollgruppe verglichen. Untersucht wurden F1 und F2 von fünf kroatischen Vokalen. Liker et al. konnten für F1 keine Unterschiede zwischen den CI-Trägern und der Kontrollgruppe finden. Für F2 wiesen die CI-Träger jedoch höhere Werte auf. Insgesamt haben die CI-Träger einen kleineren und frontierteren Vokalraum als die normal hörenden Kontrollgruppensprecher. Über den Aufnahmezeitraum wurde der Vokalraum größer und verlagerte sich nach hinten. Beide Tendenzen waren jedoch nicht signifikant.

Es gilt aber nicht nur den Entwicklungsprozess unmittelbar nach einer CI-Versorgung und der damit verbundenen wiedererlangten Sprachwahrnehmung zu untersuchen, sondern auch den Status nach der Stabilisierung der artikulatorischen Muster. Die Frage ist, inwiefern die Vokalproduktion auch dann noch beeinträchtigt ist und sich von der normal Hörender unterscheidet.

Ibertsson et al. (2008) haben die Produktion von neun schwedischen Langvokalen von zwölf CI-Trägern (Kinder, 50% prälingual ertaubt) und elf normal hörenden Kontrollgruppensprechern verglichen. Als Maß für den Vokalraum haben sie die Euklidische Distanz zum F1/F2-Mittelwert gewählt. Der Vokalraum war bei den CI-Trägern signifikant kleiner als bei den normal Hörenden. Es gab jedoch keine Interaktionen der Größe des Vokalraumes mit dem Alter der CI-Träger bei der CI-Versorgung, den Ergebnissen eines Verständlichkeitstests und einer Nonword-Repetition-Task. Basierend auf denselben Sprachdaten haben Löfqvist et al. (2010) eine weitere Studie durchgeführt. Zusätzlich zu der Messung von Ibertsson et al. (2008) wurden F1, F2 und die Summe der Euklidischen Abstände zwischen den Mittelwerten benachbarter Vokale gemessen (= Umfang des Vokalraumes). Während F1 bei den CI-Trägern signifikant tiefer war als bei den normal Hörenden, gab es bei F2 keine signifikanten Unterschiede. Die Messung der Abstände zwischen den Vokalen ergab signifikant kürzere Euklidische Distanzen bei den CI-Trägern und somit einen kleineren Vokalraum. Letzteres Ergebnis interagiert zusätzlich signifikant negativ mit einem Vokalidentifikationstest durch erfahrene Hörer. Das heißt, dass Vokale umso besser identifiziert werden, je größer die Euklidischen Abstände zwischen den Vokalklassen im F1/F2-Raum sind. Keiner der Messwerte hatte eine signifikante Interaktion mit einem Verständlichkeitstest (Bewertung durch unerfahrene Hörer, wie verständlich eine Äußerung ist). Es ergaben sich keine signifikanten Ergebnisse für die Interaktionen mit dem Alter bei der Versorgung und der CI-Tragedauer.

Nur zum Teil konsistent mit den Resultaten von Ibertsson et al. (2008) und Löfqvist et al. (2010) sind die Ergebnisse einer Studie von Neumeyer et al. (2010), in der zehn CI-Trägerinnen (vier prälingual ertaubte, sechs postlingual ertaubte Sprecherinnen) mit zehn im Alter passenden Kontrollgruppensprecherinnen verglichen wurden. Anhand von fünf deutschen Langvokalen wurden F1, F2, die Euklidischen Abstände zum F1/F2-Mittelpunkt im 4-dimensionalen DCT-Raum<sup>1</sup> und die Vokaldauern gemessen. Im Gegensatz zu den oben genannten Studien mit schwedischen Vokalen wurden hier keine Unterschiede für F1 gefunden, jedoch signifikante Unterschiede für F2. Die Mes-

---

<sup>1</sup>Die Dimensionen entsprechen den ersten 4 DCT-Werten der Formantkonturen (Zeitverläufen).

sung der Euklidischen Abstände zum F1/F2-Mittelpunkt im DCT-Raum hat in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Ibertsson et al. (2008) und Löfqvist et al. (2010) einen signifikant kleineren Vokalraum der CI-Träger im Vergleich mit der Kontrollgruppe ergeben. Zusätzlich waren die Vokaldauern bei den CI-Trägern länger als bei den normal Hörenden. Das steht wiederum in Widerspruch zu den kürzer werdenden Vokaldauern in der Langzeitstudie von Perkell (1992).

Diese Studie soll im Kapitel 3.2 weitergeführt werden, indem das Sprachmaterial von fünf auf sieben deutsche Langvokale erweitert wird und die CI-Träger in vier verschiedene Gruppen nach Alter bei der Versorgung und Zeitraum zwischen Ertaubung und Versorgung eingeteilt werden. Der Grund für die Erweiterung der Untersuchung von Neumeyer et al. (2010) ist, dass es den Ergebnissen der vorangehenden Studien zufolge in der Sprachproduktion zwischen CI-Trägern und normal Hörenden auch nach der Stabilisierung der artikulatorischen Muster noch signifikante Unterschiede gibt. Gemeinsam ist den beschriebenen Studien, dass CI-Träger einen kleineren Vokalraum und längere Vokaldauern aufweisen als ihre Kontrollgruppensprecher (außer die Vokaldauern von Perkell (1992)). Die Fläche des Vokalraumes ist jedoch ein sehr globales Maß. Das deutsche Vokalsystem bietet sehr viel bessere Möglichkeiten, die Artikulation von CI-Trägern anhand von euklidischen Distanzen in einem Merkmalsraum zwischen einzelnen Vokalpaaren, die man auf Artikulationsparameter wie Zungenhöhe, Zungenlage und Lippenrundung zurückführen kann, genauer zu betrachten. Der Untersuchung des Vokalraumes und den verschiedenen Artikulationsbewegungskoeffizienten liegen folgende Hypothesen zugrunde:

#### **Vokalraum:**

- **Hypothese 01:** Der Vokalraum von CI-Trägern ist kleiner als der der normal hörenden Kontrollgruppensprecher.
- **Hypothese 01\_b:** Der Vokalraum von CI-Trägern wird innerhalb des ersten Jahres nach einer CI-Versorgung größer.

Aufgrund des eingeschränkten auditorischen Feedbacks und der damit verbundenen Tatsache, dass CI-Träger verschiedene Vokalklassen schlechter unterscheiden können, ist die erste Hypothese, dass sie auch einen kleineren Vokalraum haben, weil sie die Vokale als ähnlicher wahrnehmen und somit nicht im selben Maße unterschiedlich unterschiedlich produzieren wie normal hörende Sprecher.

Hypothese 01\_b bezieht sich auf die Langzeitstudie: Die CI-Träger können vor der CI-Versorgung ihre eigene Vokalproduktion kaum bis gar nicht mehr wahrnehmen. Durch die CI-Versorgung erlangen sie ein (eingeschränktes) auditorisches Feedback und können ihre Vokalproduktion somit wieder kontrollieren. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die CI-Träger von vor der CI-Versorgung bis ein Jahr danach ihren Vokalraum ausdehnen.

#### Artikulationsbewegungskoeffizienten:

- **Hypothese 02:** Es gibt keine Unterschiede zwischen CI-Trägern und den Kontrollgruppensprechern bei Distanzen zwischen Vokalen, die sich durch die **Zungenhöhe** unterscheiden.

Hypothese 02 ist dadurch begründet, dass die Zungenhöhe mit der Mundöffnung und dem Ausmaß der Bewegung des Kiefers beziehungsweise des Kinns zusammenhängt. Alle diese Faktoren sind bei einem Gesprächspartner absehbar. Da bei CI-Trägern das auditorische Feedback beeinträchtigt ist, ist anzunehmen, dass neben der Sensomotorik vor allem auf visuelles Feedback und Absehen zurückgegriffen wird. Da die Zungenhöhe gut sichtbar ist, werden für diesen Parameter keine signifikanten Unterschiede zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern erwartet.

- **Hypothese 03:** CI-Träger produzieren im Gegensatz zu normal Hörenden kürzere Distanzen zwischen den Vokalen, die sich durch die **Zungenlage** (vorne vs. hinten) unterscheiden.

Bei Hypothese 03 verhält es sich genau gegensätzlich: Die Zungenlage, ob ein Laut weiter vorne oder weiter hinten im Mundraum produziert wird, ist von Außen schlecht erkennbar. Nach der Annahme, dass am besten reproduziert wird, was am besten absehbar ist, kann man davon ausgehen, dass sich die Zungenlage von CI-Trägern signifikant von der normal hörender Sprecher unterscheiden wird. Es wird eine kürzere Distanz für die CI-Träger erwartet, da wie in Hypothese 01 formuliert, für CI-Träger ein kleinerer Vokalraum und somit auch kürzere Abstände zwischen den einzelnen Vokalen erwartet werden.

- **Hypothese 04: Lippenrundung:** Distanzen zwischen ungerundeten und gerundeten Vokalen (z.B. /i:-y:/) sind bei CI-Trägern kürzer als bei normal Hörenden.

Bei gerundeten Vokalen wird - wie in Hypothese 03 - angenommen, dass es Unterschiede zwischen den CI-Trägern und der Kontrollgruppe gibt, da die Zungenlage bei Lippenrundung verdeckt und somit auch nicht absehbar ist.

### CI-Gruppen:

Neben der Untersuchung der einzelnen Artikulationsbewegungskoeffizienten, zusätzlich zur globalen Betrachtung des Vokalraumes, gibt es noch einen weiteren Grund für die Erweiterung der oben genannten Studie von Neumeyer et al. (2010): Es macht den Anschein, dass die Ergebnisse der bisherigen Studien zweigeteilt sind. Zum einen werden für die CI-Träger niedrigere F1-Werte und keine Unterschiede in F2 gefunden (Perkell (1992), Schenk et al. (2003), Ibertsson et al. (2008)), zum anderen keine Unterschiede in F1, dafür signifikante Veränderungen in F2 (Liker et al. (2007), Neumeyer et al. (2010)). Diese Studien haben gemeinsam, dass abgesehen von Schenk et al. (2003), die nur postlingual ertaubte CI-Träger untersucht haben, die Gruppen der hörgeschädigten Probanden bezogen auf das Alter bei der Ertaubung und das Alter bei der Versorgung sehr inhomogen waren. Diese Faktoren spielen aber nachgewiesenermaßen eine wichtige Rolle in der Performanz eines CI-Trägers (Fryauf-Bertschy & Tyler (1997)). Es liegt die Vermutung nahe, dass das Ergebnis abhängig von der Zusammensetzung der Gruppe der untersuchten CI-Träger variiert. Für die in Kapitel 2.1 beschriebenen vier Sprechergruppen lassen sich folgende Hypothesen aufstellen:

- **Hypothese 05:** Postlingual ertaubte CI-Träger, die zeitnah mit einem CI versorgt wurden, weisen im Vergleich zu den normal Hörenden die kleinsten beziehungsweise keine Unterschiede auf.

Bei CI-Trägern, die erst nach der Spracherwerbsphase ertaubt sind und danach zeitnah mit einem CI versorgt wurden, werden nur sehr geringfügige bis keine signifikanten Unterschiede zur Sprachproduktion von normal hörenden Sprechern erwartet. Der Grund ist, dass diese CI-Träger normal beziehungsweise mit nur schwacher Hörbeeinträchtigung Sprechen gelernt haben. Somit sind nach dem DIVA-Modell zum einen die Repräsentationen der einzelnen Sprachlaute in der „Speech Sound Map“ angelegt. Zum anderen besteht auch eine stabile Verknüpfung zwischen den motorischen Abläufen

bei der Artikulation und den auditorischen und sensomotorischen Zielrepräsentationen. Diese Verknüpfung wird bei normal Hörenden durch das auditorische Feedback ständig kontrolliert und nachjustiert. Sobald diese Feedbackschleife bei einer Ertaubung (stark) beeinträchtigt wird, wird die Artikulation ungenauer. Dies ist jedoch ein sehr langsamer Prozess und deshalb wird bei den zeitnah versorgten CI-Trägern davon ausgegangen, dass sich deren Ergebnisse nicht signifikant von denen der Kontrollgruppensprecher unterscheiden.

- **Hypothese 06:** Die Gruppe der prälingual ertaubten CI-Träger, die spät versorgt wurden, weist im Vergleich zu ihrer normal hörenden Kontrollgruppe die größten Unterschiede auf.

Da CI-Träger, die bei Geburt oder vor Spracherwerb ertaubt sind, die Repräsentationen von Sprachlauten in der „Speech Sound Map“ und die Verknüpfungen zwischen den Artikulationsbewegungen und den auditorischen Zielrepräsentationen einzelner Laute nur mit stark beeinträchtigtem auditorischen Feedback anlegen konnten, sind diese lange nicht so stabil und präzise wie die der postlingual ertaubten CI-Träger. Die Gruppe der prälingual ertaubten CI-Träger, die erst nach Spracherwerb mit einem Implantat versorgt wurden, hat zudem den Nachteil, dass sie über viele Jahre auf ein sehr stark eingeschränktes oder gar kein auditorisches Feedback zurückgreifen konnte. Deshalb wird davon ausgegangen, dass diese Gruppe im Vergleich zu ihrer Kontrollgruppe die größten Unterschiede aufweisen wird.

## 3.2 Vergleich CI-Träger und normal hörende Sprecher

Dieser Abschnitt beinhaltet die erste der beiden Studien zur Vokalartikulation. Die Produktion von Vokalen von CI-Trägern wird mit der von normal hörenden Kontrollgruppensprechern verglichen. Der Aufbau ist dabei wie folgt: Im Kapitel „Methode“ (Kapitel 3.2.1) wird ausgeführt, welche Sprecher an der Studie teilgenommen haben (Kapitel 3.2.1.1), welches Sprachmaterial sie gelesen haben (Kapitel 3.2.1.2) und wie die erhobenen Sprachdaten weiterverarbeitet und analysiert wurden (Kapitel 3.2.1.3). Die Ergebnisse der Studie sind in Kapitel 3.2.2 zu finden. Sie sind in mehrere Unterkapitel, aufgegliedert nach den untersuchten Parametern, eingeteilt. Daran schließt sich die Diskussion der gefundenen Resultate an (Kapitel 3.2.3).

### 3.2.1 Methode

#### 3.2.1.1 Sprecher

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, wurden die CI-Träger in vier Gruppen eingeteilt. Für jeden CI-Träger wurde ein passender Kontrollgruppensprecher aufgenommen. Die normal hörenden Sprecher wurden jedoch nicht paarweise mit den CI-Trägern verglichen, sondern ebenso vier Kontrollgruppen zugeordnet, die die gleiche Alters- und Geschlechtsverteilung haben wie die CI-Gruppen. Alle Sprecher kommen aus dem Raum München und sprechen keinen starken Dialekt. Details zu den einzelnen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern sind den Tabellen im Anhang B zu entnehmen.

Insgesamt haben an dieser Studie 48 CI-Träger und 48 Kontrollgruppensprecher teilgenommen. Wie man in der tabellarischen Übersicht 3.1 sehen kann, ist die Aufteilung in die vier Gruppen nicht ganz gleichmäßig. Leider ist es häufiger der Fall, dass zwischen der Ertaubung und der Versorgung mit einem Cochlear Implantat mehrere Jahre vergehen. Dementsprechend sind die Gruppen 2 und 4 mit 16 beziehungsweise 15 Sprechern größer als die Gruppen 1 und 3 (acht beziehungsweise neun Sprecher). Da in Deutschland erst seit Ende der 90er Jahre Babys und Kleinkinder vor dem Spracherwerb mit einem CI versorgt werden, setzt sich Gruppe 1 aus Kindern zusammen. Der Altersdurchschnitt der einzelnen CI- und Kontrollgruppen ist ebenfalls in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Gruppe	gesamt	weibliche Sprecher	männliche Sprecher	Durchschnitt Alter in Jahren CI-Träger	Durchschnitt Alter in Jahren Kontrollgruppe
CI_1	8	3	5	10.75	10.63
CI_2	16	13	3	30.06	29.69
CI_3	9	8	1	45	42.22
CI_4	15	10	5	59.93	59.73
gesamt	48	34	14	36.44	35.57

Tabelle 3.1: Gruppenverteilung der CI-Träger und Altersdurchschnitt der einzelnen CI- und Kontrollgruppen.

### 3.2.1.2 Sprachmaterial

Es wurden sieben deutsche Langvokale (/a:, e:, i:, o:, u:, 2:, y:/) untersucht. Die Zielvokale stehen in zweisilbigen Wörtern immer in der ersten und gleichzeitig betonten Silbe. Alle Zielwörter sind in den Trägersatz „Ich habe ... gesagt.“ eingebettet. Die Satzbetonung liegt immer auf dem jeweiligen Zielwort. Durch den konstanten /tVt/-Kontext sollen koartikulatorische Einflüsse auf die Langvokale durch benachbarte Konsonanten möglichst gering gehalten werden.

Die Sätze wurden in randomisierter Reihenfolge zusammen mit dem in Kapitel 2.2 beschriebenen Sprachmaterial aufgenommen. Jeder einzelne Satz wurde sechsmal wiederholt. Insgesamt wurden von jedem Probanden also 42 Zielvokale (7 Langvokale \* 6 Wiederholungen) aufgenommen.

Das Wortmaterial für die Vokaluntersuchung ist in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Der Vokal /i:/ konnte leider nicht anhand des in der Tabelle 3.2 gelisteten Wortes „Titel“ analysiert werden, da viele Versuchspersonen eine Dialektvariante mit einem kurzen /i/ lasen. Als Ersatz wurde das Wort „kriegen“, das ebenfalls im Rahmen dieser Aufnahmesitzungen aufgenommen wurde, gewählt. Das Zielwort steht in dem Trägersatz „Hier steht ... geschrieben.“. Ein deutlicher Nachteil, der an dieser Stelle erwähnt werden muss, ist, dass der koartikulatorische Einfluss sich durch die velare Artikulationsstelle des /g/ im Gegensatz zum alveolaren /t/ (und /r/ in „kriegen“) verändert.

Vokal	Satz
/a:/	Ich habe 'Taten' gesagt.
/e:/	Ich habe 'stetig' gesagt.
/i:/	Ich habe 'Titel' gesagt.
/o:/	Ich habe 'Toter' gesagt.
/u:/	Ich habe 'Stute' gesagt.
/y:/	Ich habe 'Tüte' gesagt.
/2:/	Ich habe 'töten' gesagt.

Tabelle 3.2: Trägersätze und Zielwörter der Vokalanalyse.



### 3.2.1.3 Datenbearbeitung und -auswertung

Für die Formantanalyse wurde der Formanttracker 'To Formant (burg)' in Praat (Boersma & Weenink (2001)) verwendet. Berechnet wurden die ersten zwei Formanten mit einer Fensterlänge von 0.025 Sekunden und einer Fensterverschiebung von 0.005 Sekunden. Bei diesem Formanttracker ist es notwendig, den 'Maximum Formant (in Hertz)' anzugeben. Die Richtwerte liegen bei 5500Hz für erwachsene Frauen, 5000Hz für erwachsene Männer und circa 8000Hz für Kinder. Die Formanten wurden mit diesen Richtwerten berechnet.

Die weiteren Berechnungen wurden mit R (Team R Core (2014)) durchgeführt. Für die Analyse des **ersten und zweiten Formanten** wurden die Mediane der Formantwerte zwischen 10% und 90% des Zeitverlaufs der jeweiligen Vokale berechnet. Die intrinsische Dynamik der Formanten wird anhand von **Interquartilsabständen** beurteilt. Höhere Werte entsprechen einer größeren Dynamik innerhalb eines Vokals und somit einer schlechteren Kontrolle der Artikulatoren. Der Interquartilsabstand (engl. interquartile range, abgekürzt IQR) ist die Differenz der Quartile  $Q_{.25}$  und  $Q_{.75}$ :

$$IQR = Q_{.75} - Q_{.25}$$

Innerhalb eines Interquartilsabstandes liegen 50% aller Mess- beziehungsweise in diesem Fall Formantwerte. Sowohl der Median als auch der Interquartilsabstand sind unempfindlich gegenüber Ausreißern.

Als Maß für die Ausdehnung des Vokalraumes wurden die Flächen des Vokalraumes gemessen. Die **Fläche eines Fünfecks** mit den Eckpunkten /i:, e:, a:, o:, u:/ wurde im Koordinatensystem (x-Achse: F2, y-Achse: F1) aus drei Dreiecken (/i:, u:, o:/, /i:, e:, o:/ und /e:, a:, o:/) anhand des Satz des Heron berechnet.

Um die vier gerundeten Vokale genauer betrachten zu können, wurde die **Fläche eines Vierecks** mit den Eckpunkten /y:, u:, 2:, o:/ anhand derselben Formel im Koordinatensystem (x-Achse: F2, y-Achse: F1) mit zwei Dreiecken mit den Eckpunkten /y:, u:, 2:/ und /2:, u:, o:/ berechnet.

Für die Betrachtung einzelner **Artikulationsbewegungskoeffizienten** wurden die Euklidischen Distanzen zwischen einzelnen Vokalschwerpunkten gemessen. Ein Vokalschwerpunkt ist der Durchschnittswert der sechs Wiederholungen eines Vokals von einem Sprecher. Die Distanzen zwischen den Vokalen wurden wie in Tabelle 3.3 den Artikulationsbewegungskoeffizienten **Zungenhöhe, Zungenlage und Lippenrundung** zugeordnet:

Artikulationsbewegungskoeffizienten	Distanzen
Zungenhöhe	/i:-e:/ /y:-2:/ /u:-o:/
Zungenlage	/y:-u:/ /2:-o:/
Lippenrundung	/i:-y:/ /e:-2:/

Tabelle 3.3: Überblick über die untersuchten Artikulationsbewegungskoeffizienten und die dazugehörigen Distanzen zwischen einzelnen Vokalschwerpunkten.

Die Artikulationsbewegungskoeffizienten Zungenhöhe und Zungenlage können den Formanten F1 und F2 zugeordnet werden.

Ergänzend zu den bisher aufgelisteten Werten, die alle auf den Formantwerten basieren, wurde die **Grundfrequenz F0** und die **Dauer der Vokale** gemessen. Beide Messungen dienen dazu, die Veränderungen der Formantverläufe und -werte durch eventuelle Interaktionen besser verstehen und erklären zu können. Die F0 Werte wurden anhand des EMU 'Pitch & Formant Tools' (Methode: ESPS) mit einer Fensterlänge von 0.075 Sekunden und einer Fensterverschiebung von 0.01 Sekunden berechnet. Als minimal annehmbare Frequenz wurde 60Hz eingestellt, als maximale 400Hz. Für die Auswertung wurde F0 wie die Formantwerte gemessen: der Median von 10-90% des Zeitverlaufes. Die Vokaldauern wurden anhand der Wortdauern wie folgt normalisiert:

$$\text{normalisierte Vokaldauer} = \frac{\text{Vokaldauer}}{\text{Wortdauer}}$$

## Statistik

Um für einen Parameter den Unterschied zwischen einer CI-Gruppe und der dazugehörigen Kontrollgruppe zu untersuchen, wurde mit R (Team R Core (2014)) und dem R-Paket lme4 (Bates et al. (2012)) eine „linear mixed effects analysis“ durchgeführt. Neben dem untersuchten Parameter als abhängiger Variable wurden dem Modell noch Gruppe, Geschlecht und Alter als between Faktoren hinzugefügt. Random Faktoren sind Wiederholung und Versuchsperson. Es wurde für jeden Parameter, für jeden Vokal und jede Gruppenkombination ein eigenes Modell berechnet. (Beispiel: Unterschied in F0 zwischen Gruppe „CI 2“ und „Kontrollgruppe 2“ für den Vokal /e:/.)

Bei jedem Modell wurden Likelihood Ratio Tests vom kompletten Modell und reduzierten Modellen berechnet. Wenn die Auslassung eines Faktors nicht signifikant war, wurde er aus dem Modell herausgenommen.

Auch die Unterschiede zwischen den vier CI-Gruppen wurden der Vollständigkeit halber im Rahmen dieser Studie berechnet. Die Ergebnisse sind aber in dieser Dissertation nicht aufgeführt, da die vier CI-Gruppen aufgrund des sehr unterschiedlichen Durchschnittsalters (siehe Tabelle 3.1) kaum vergleichbar sind. Vor allem die Gruppe 1, die hauptsächlich aus Kindern besteht, unterscheidet sich wahrscheinlich hauptsächlich aufgrund der kindlichen Anatomie des Vokalraumes von den anderen drei Gruppen, die sich hauptsächlich aus Erwachsenen zusammensetzen.

## 3.2.2 Ergebnisse

### 3.2.2.1 Formantwerte

Die Ergebnisse der ersten beiden Formantfrequenzen (F1 und F2) sind in der Tabelle 3.4 zusammengefasst. Unter den p-Werten ist in jedem Feld die gemessene Differenz der Formantmittelwerte zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppe in Prozent angegeben. Positive Werte bedeuten, dass die gemessenen Werte der CI-Träger höher liegen als die der normal hörenden Sprecher. Vokale, bei denen sich die CI-Gruppe signifikant von ihrer zugehörigen Kontrollgruppe unterscheidet, sind fett hervorgehoben. Zusätzlich sind die Unterschiede zwischen den CI-Trägern und den Kontrollgruppensprechern in F1 und F2 in einem paarweisen Vergleich der Vokalräume in Abbildung 3.3 und in einer schematischen Darstellung (Abbildung 3.1) getrennt nach den vier (CI vs. KG-) Gruppen visualisiert.

Aus Tabelle 3.4 ist an der Differenz zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern (in Prozent) zu sehen, dass die Tendenzen von F1 mit Ausnahme von /i:/ und /y:/ für Gruppe 2 durchgehend negativ sind. Für Gruppe 1 sind alle Vokale außer /a:/ signifikant tiefer. Bei Gruppe 2 unterscheiden sich die CI-Gruppe und die Kontrollgruppe bei keinem der sieben Vokale signifikant, bei Gruppe 3 nur bei /a:/. In der Gruppe 4 sind die gerundeten Vokale /o:/, y:/ und /2:/ der CI-Träger signifikant tiefer.

Vokal	/a:/	/e:/	/i:/	/o:/	/u:/	/y:/	/2:/
<b>F1</b>							
<b>CI vs.KG</b>	—	.	*	*	*	*	*
<b>Gruppe 1</b>	−0.8%	<b>0.089</b> −9.0%	<b>0.032</b> −14.2%	<b>0.021</b> −12.7%	<b>0.012</b> −16.6%	<b>0.023</b> −11.3%	<b>0.013</b> −11.5%
<b>CI vs.KG</b>	0.637	0.158	0.278	0.637	0.722	0.699	0.333
<b>Gruppe 2</b>	−2.4%	−5.1%	18.8%	−1.7%	−2.6%	2.2%	−3.8%
<b>CI vs.KG</b>	.	—	0.124	0.41	0.739	0.127	0.429
<b>Gruppe 3</b>	<b>0.057</b> −8.3%	−2.7%	−8.4%	−5.1%	−2.1%	−7.0%	−4.9%
<b>CI vs.KG</b>	—	0.167	0.594	.	0.388	.	*
<b>Gruppe 4</b>	−0.1%	−4.9%	−2.4%	<b>0.095</b> −6.4%	−3.6%	−6.2%	<b>0.028</b> −7.1%
<b>F2</b>							
<b>CI vs.KG</b>	—	0.484	.	*	0.144	0.304	**
<b>Gruppe 1</b>	1.0%	1.9%	0.2%	−10.8%	−7.7%	−6.3%	<b>0.006</b> −10.2%
<b>CI vs.KG</b>	0.123	0.208	.	.	.	*	**
<b>Gruppe 2</b>	5.3%	−3.1%	−3.6%	12.5%	14.1%	−8.4%	<b>0.004</b> −7.6%
<b>CI vs.KG</b>	*	***	—	—	0.235	***	*
<b>Gruppe 3</b>	<b>0.029</b> −9.0%	<b>0.0004</b> −0.7%	−0.5%	0.4%	6.9%	<b>0.0005</b> 0.7%	<b>0.020</b> 7.6%
<b>CI vs.KG</b>	*	0.544	—	0.568	—	—	0.465
<b>Gruppe 4</b>	7.2%	−1.6%	0.2%	2.4%	−0.4%	−0.1%	2.2%

Tabelle 3.4: Ergebnisse für F1 (oben) und F2 (unten): Obere Zeile: Signifikanzen (gegebenenfalls mit einem „ . “ bzw. einem bis drei „ \* “ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile: Differenz der F1 bzw. F2-Mittelwerte zwischen CI- und KG-Gruppe in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte / negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte).

Bei den F2-Werten gibt es keine vergleichbar universale Tendenz über alle vier Gruppen wie für F1. Bei Gruppe 1 und 3 sind die Tendenzen aufgeteilt nach gerundeten und ungerundeten Vokalen. In den Ergebnissen für Gruppe 2 ist eine Zentralisierung, das heißt eine Verschiebung der Vokale in Richtung Zentrum des Vokalraumes, zu erkennen. Bei Gruppe 4 ist kein Trend abzuleiten. Signifikant unterscheiden sich die CI-Träger und die normal hörenden Sprecher bei Gruppe 1 bei den Vokalen /i:/, o:/ und /2:/. Bei

Gruppe 2 unterscheiden sich fünf von sieben Langvokale signifikant von den Werten der normal hörenden Sprecher (Ausnahmen: /a:/ und /e:/). Im Vergleich zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern bei Gruppe 3 gibt es signifikante Unterschiede für /a:, e:, y:/ und /2:/, bei Gruppe 4 nur bei /a:/.

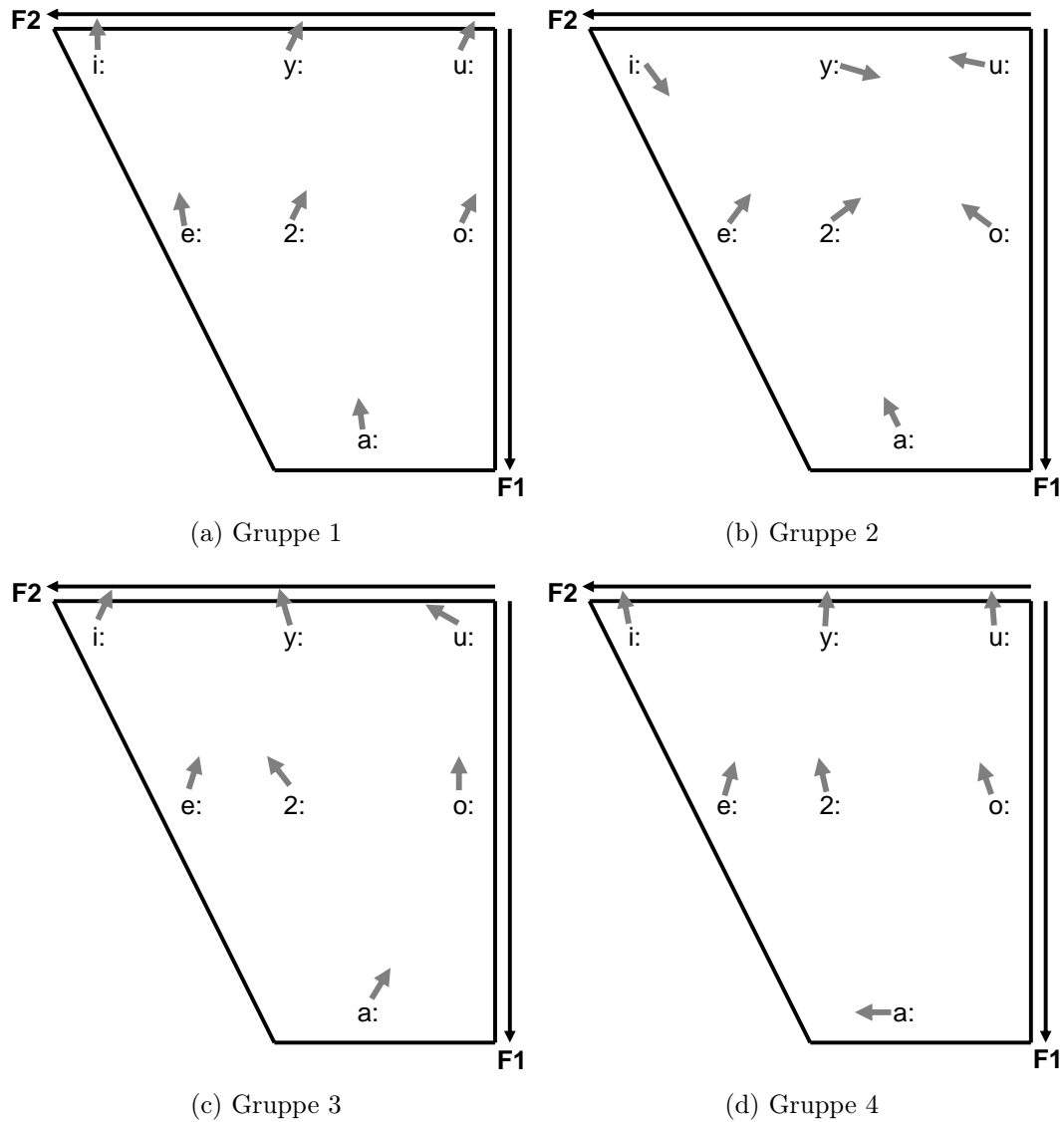


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Unterschiede in F1 und F2 zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern getrennt nach Gruppen. Die Pfeile geben an, in welche Richtung der Vokalschwerpunkt der CI-Gruppe im Vergleich zum Schwerpunkt der Kontrollgruppe verschoben ist. Die Länge der Pfeile gibt keine Auskunft über das Ausmaß der Verschiebung. x-Achse: F2 in Hz (fallend), y-Achse F1 in Hz (fallend).

### 3.2.2.2 Intrinsische Dynamik

Die Tabelle 3.5 stellt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der intrinsischen Dynamik für F1 und F2 dar. Zusätzlich zu den p-Werten ist in jedem Feld die gemessene Differenz der Mittelwerte der intrinsischen Dynamik (für F1 beziehungsweise F2) zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern in Prozent angegeben. Positive Werte bedeuten, dass die gemessenen Werte der CI-Träger höher liegen als die der normal hörenden Sprecher, oder mit anderen Worten, dass die Vokale der CI-Träger mehr Dynamik aufweisen als die der Kontrollgruppe.

In der intrinsischen Dynamik von F1 gibt es kaum signifikante Unterschiede zwischen den CI-Trägern und den Kontrollsprechern. Bei Gruppe 1 weisen die CI-Träger (mit zwei Ausnahmen) tiefere Werte auf als die normal hörenden Sprecher. Signifikante Unterschiede gibt es nur bei /a:/ (höher) und /2:/ (tiefer). Mit einer Ausnahme durchgehend höhere Werte ergeben sich für die CI-Träger aus Gruppe 2. Signifikant höhere Werte als ihre Kontrollgruppe haben sie nur bei /y:/. Bei Gruppe 3 ist kein Trend zu erkennen. Bei /u:/ sind die Werte der CI-Träger signifikant höher als bei der Kontrollgruppe. In der Gruppe 4 gibt es keine signifikanten Unterschiede. Es gibt jedoch eine Tendenz: mit einer Ausnahme sind die Werte der CI-Träger tiefer als die der normal Hörenden.

Vokal	/a:/	/e:/	/i:/	/o:/	/u:/	/y:/	/2:/
<b>Intrinsische Dynamik F1</b>							
<b>CI vs.KG Gruppe 1</b>	<b>**</b> <b>0.003</b> 18.4%	0.194 −44.4%	0.372 26.3%	0.223 −45.7%	0.191 −27.8%	0.349 −21%	<b>.</b> <b>0.098</b> −60.1%
<b>CI vs.KG Gruppe 2</b>	0.621 8.7%	0.352 23.9%	0.456 57.5%	0.186 30.7%	0.112 −52.5%	<b>*</b> <b>0.016</b> 32.8%	0.303 22.8%
<b>CI vs.KG Gruppe 3</b>	0.348 31.5%	0.859 −9.1%	0.648 −18.1%	0.65 −13.1%	<b>*</b> <b>0.026</b> 83.5%	0.59 25%	— −4.5%
<b>CI vs.KG Gruppe 4</b>	0.512 19.8%	0.362 −21.5%	0.133 −27.6%	0.195 −21.3%	0.253 −35.2%	0.452 −12.4%	0.144 −29%

Intrinsische Dynamik F2							
<b>CI vs.KG</b>	—	—	*	0.571	0.699	0.398	.
<b>Gruppe 1</b>	4.4%	−2.8%	64.8%	10.3%	6.1%	21.3%	59.2%
<b>CI vs.KG</b>	.	.	0.142	*	*	*	.
<b>Gruppe 2</b>	38.6%	58.5%	36.6%	−20.4%	−42.9%	50.8%	32.7%
<b>CI vs.KG</b>	*	—	—	0.598	0.164	0.313	.
<b>Gruppe 3</b>	45.6%	10%	−6.8%	−10.4%	30.4%	25.6%	33.7%
<b>CI vs.KG</b>	—	0.675	0.711	0.445	0.122	0.132	0.357
<b>Gruppe 4</b>	3.1%	7%	−9.2%	−13.2%	−17.1%	32.1%	16.7%

Tabelle 3.5: Ergebnisse intrinsische Dynamik F1 (oben) & F2 (unten): Obere Zeile: Signifikanzen (gegebenenfalls mit einem „.“ bzw. einem bis drei „\*“ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile: Differenz der jeweiligen Mittelwerte zwischen CI- und KG-Gruppe in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte / negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte).

Mehr signifikante Unterschiede im Vergleich zu F1 ergeben sich für die intrinsische Dynamik von F2. Dafür sind jedoch kaum klare Tendenzen zu erkennen. Bei Gruppe 1 sind nur /i:/ und /2:/ signifikant höher. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich bei Gruppe 2 alle Vokale außer /i:/ und /2:/ signifikant. Bei Gruppe 3 sind die Vokale /a:/ und /2:/ signifikant höher, bei Gruppe 4 gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den CI-Trägern und den Kontrollgruppensprechern.

### 3.2.2.3 Grundfrequenz

Wie in den vorangegangenen Kapiteln sind die Ergebnisse der Grundfrequenz in einer Tabelle (3.6) aufgelistet. Neben dem p-Wert und einer optischen Hervorhebung, wenn sich eine CI- und ihre zugehörige Kontrollgruppe signifikant unterscheiden, zeigen die Vorzeichen der Differenzen der F0-Mittelwerte in Prozent an, ob CI-Träger einer Gruppe im Vergleich zu ihrer Kontrollgruppe eine höhere oder tiefere Grundfrequenz aufweisen. Zusätzlich sind die Ergebnisse in Abbildung 3.2 dargestellt.

Vokal	/a:/	/e:/	/i:/	/o:/	/u:/	/y:/	/2:/
<b>CI vs.KG</b> <b>Gruppe 1</b>	0.233 6.2%	0.38 4.9%	0.65 3.1%	0.739 1.8%	<b>***</b> <b>7.68e-05</b> 5.9%	0.543 3.4%	— 4.7%
<b>CI vs.KG</b> <b>Gruppe 2</b>	0.163 6.7%	0.162 6.9%	— 1.4%	0.279 5.3%	<b>***</b> <b>1.815e-06</b> 3.3%	<b>***</b> <b>4.286e-06</b> 5.5%	<b>***</b> <b>2.05e-07</b> 7.5%
<b>CI vs.KG</b> <b>Gruppe 3</b>	0.303 -8.2%	0.952 -3%	— 0.6%	0.669 -5%	0.292 -6.4%	0.116 -10%	— -1.4%
<b>CI vs.KG</b> <b>Gruppe 4</b>	<b>**</b> <b>0.01</b> -9.2%	0.339 -6.4%	0.626 -2.5%	<b>.</b> <b>0.063</b> -11.9%	0.124 -8.7%	0.337 -5.2%	<b>.</b> <b>0.074</b> -10.4%

Tabelle 3.6: Ergebnisse Grundfrequenz F0: Obere Zeile: Signifikanzen (gegebenenfalls mit einem „.“ bzw. einem bis drei „\*“ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile: Differenz der F0-Mittelwerte zwischen CI- und KG-Gruppe in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte / negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte).

Wie in Abbildung 3.2 zu sehen ist, weisen die Ergebnisse der Grundfrequenz sehr eindeutige und klare Tendenzen auf. Die prälingual ertaubten Sprecher aus den Gruppen 1 und 2 weisen im Vergleich zu ihren Kontrollgruppensprechern durchgehend bei allen Vokalen eine höhere Grundfrequenz auf. Bei Gruppe 1 unterscheiden sich die CI- und die Kontrollgruppe nur bei /u:/, bei Gruppe 2 die drei gerundeten Vokale /u:, y:/ und /2:/ signifikant.

Im Gegensatz dazu ist die Grundfrequenz bei den postlingual ertaubten Sprechern im Vergleich zu den normal hörenden Sprechern bei allen Vokalen tiefer (außer /i:/ bei Gruppe 3). Die CI-Träger aus Gruppe 3 unterscheiden sich in keinem Vokal signifikant von ihren Kontrollgruppensprechern. Gruppe „4 CI“ und „4 KG“ unterscheiden sich signifikant in den tiefen hinteren Vokalen /a:, o:/ und /2:/.



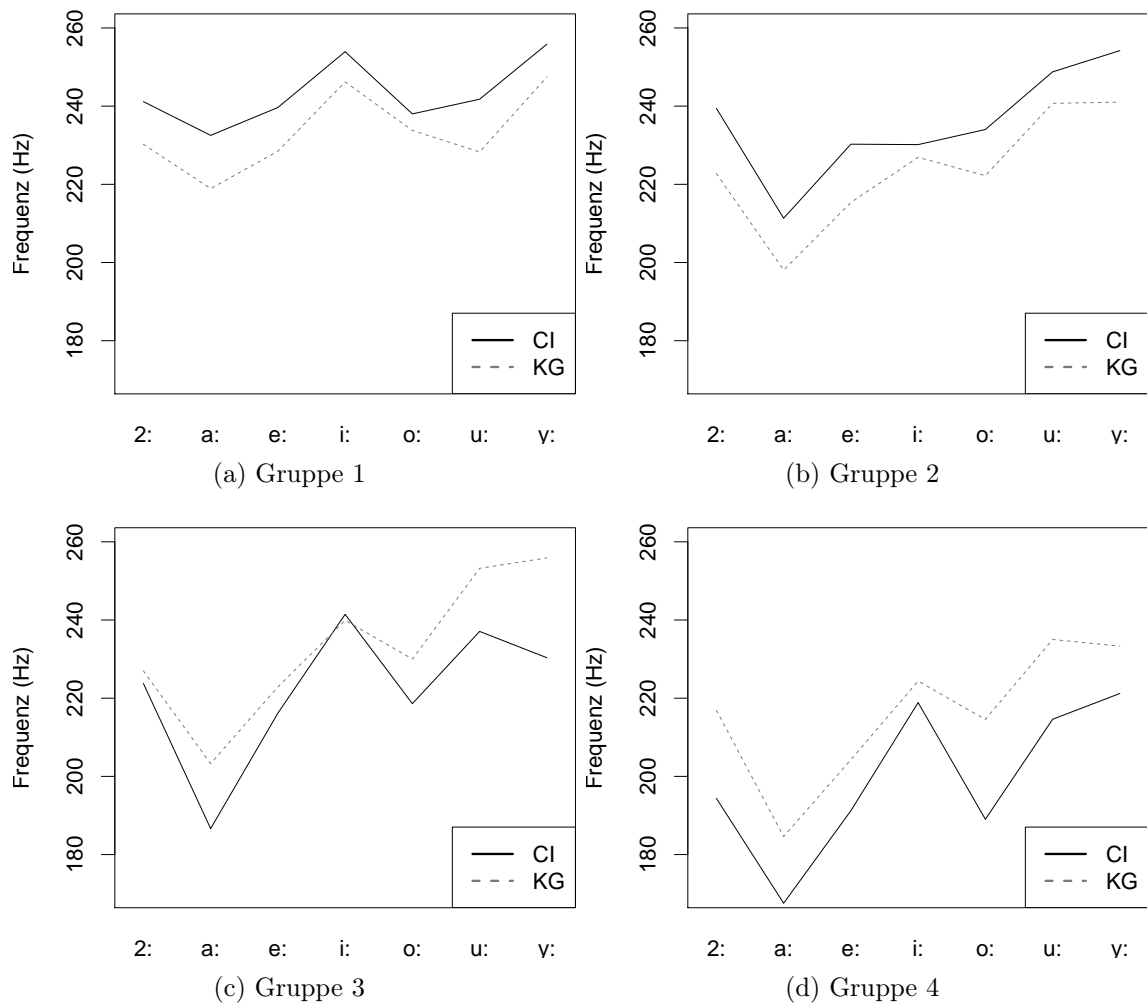


Abbildung 3.2: Paarweise Darstellung der F0-Ergebnisse der 4 CI- und KG-Gruppen.

### 3.2.2.4 Relative Vokaldauern

Die hier beschriebenen Vokaldauern sind relative Dauern, weil sie anhand der Wortdauern normalisiert wurden. Deswegen geht es im Folgenden nicht um gemessene Vokaldauern, sondern um die Anteile der Vokaldauer an der Wortdauer = V%-Dauer. In der Tabelle mit den Ergebnissen der relativen Vokaldauern (V%-Dauer) 3.7 sind die Differenzen der V%-Dauer-Mittelwerte zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern in Prozent angegeben. Positive Werte sagen aus, dass die CI-Träger im Vergleich zu ihrer Kontrollgruppe längere V%-Dauern produziert haben.

Vokal	/a:/	/e:/	/i:/	/o:/	/u:/	/y:/	/ɜ:/
	<b>**</b>					<b>*</b>	
<b>CI vs.KG Gruppe 1</b>	<b>0.002</b> -12.4%	0.235 -7.1%	0.25 8.8%	0.398 -4.4%	0.153 -6.3%	<b>0.014</b> -10.8%	0.136 -7.4%
	<b>*</b>						
<b>CI vs.KG Gruppe 2</b>	<b>0.034</b> -10%	— -0.2%	0.68 1.9%	0.294 -5.5%	— -0.5%	0.803 2.2%	— 0.3%
<b>CI vs.KG Gruppe 3</b>	0.897 -2.8%	0.181 -7.6%	— 2%	0.682 2.3%	0.538 -3.8%	0.286 7.3%	— -1.5%
						<b>*</b>	
<b>CI vs.KG Gruppe 4</b>	— 0.5%	0.107 8.6%	0.735 1.4%	0.415 3.8%	0.338 5.3%	<b>0.032</b> 11%	0.194 5.8%

Tabelle 3.7: Ergebnisse relative Vokaldauern (V%-Dauer): Obere Zeile: Signifikanzen (gegebenenfalls mit einem „.“ bzw. einem bis drei „\*“ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile: Differenz der V%-Mittelwerte zwischen CI- und KG-Gruppe in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte / negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte).

Die prälingual ertaubten Sprecher haben überwiegend kürzere V%-Dauern als ihre zugehörigen Kontrollgruppensprecher. Bei Gruppe 1 sind alle V%-Dauern kürzer als die der normal hörenden Sprecher. Signifikant kürzer sind /a:/ und /y:/. In der Gruppe 2 ist nur /a:/ signifikant kürzer. Insgesamt sind in Gruppe 2 bei vier der sieben Langvokale die V%-Dauern der CI-Träger kürzer als bei den Kontrollsprechern, ebenso wie in Gruppe 3. Bei Gruppe 3 gibt es jedoch keine signifikanten Unterschiede. Die postlingual ertaubten CI-Träger der Gruppe 4 weisen durchgehend längere V%-Dauern auf als ihre Kontrollgruppensprecher. Sie unterscheiden sich nur in /y:/ signifikant.

### 3.2.2.5 Vokalräume

Da für jede Versuchsperson nur eine Fläche des Vokalraumes berechnet werden kann, sind es insgesamt zu wenig Werte, um eine valide Statistik errechnen zu können. Aus diesem Grund erfolgt die Auswertung dieses Parameters deskriptiv. Die Mittelwerte der Flächen der einzelnen Gruppen sind in Tabelle 3.8 aufgelistet. Der jeweils größere Wert ist hervorgehoben und der Unterschied in der Größe eines Vokalraumes ist in Prozent angegeben. Ein positiver Wert bedeutet, dass der von den CI-Trägern produzierte Vokalraum größer ist.

Zusätzlich sind die Vokalräume der vier CI- und Kontrollgruppen paarweise in Abbildung 3.3 dargestellt. In jeder der vier Einzelabbildungen ist jeweils der Vokalraum der CI-Gruppe mit durchgezogener Linie und der der Kontrollgruppe mit gestrichelter Linie eingezeichnet.

Gruppe	Fläche Vokalraum /i:, e:, a:, o:, u:/	Fläche gerundete Vokale /u:, o:, 2: y:/
<b>1 CI</b>	<b>578051</b>	126684.6
	2.6%	−13.2%
<b>1 KG</b>	563360.5	<b>145972.9</b>
<b>2 CI</b>	433073.4	82112.1
	−18%	−32.1%
<b>2 KG</b>	<b>528351.9</b>	<b>120850.5</b>
<b>3 CI</b>	<b>427359.5</b>	101624.4
	1.4%	−2.7%
<b>3 KG</b>	421501.9	<b>104402.7</b>
<b>4 CI</b>	404746.1	85971.1
	−0.2%	−11%
<b>4 KG</b>	<b>405442.3</b>	<b>96587</b>

Tabelle 3.8: Flächen der Vokalräume und des Vierecks mit den Eckpunkten /u:, o:, 2: y:/ (Einheit:  $Hz^2$ ): Obere Zeile: Mittelwert CI / Mittlere Zeile: Differenz der Mittelwerte der CI- und KG-Gruppe in Prozent (Positiver Wert = CI > KG = größerer bzw. negativer Wert = CI < KG = kleinerer Vokalraum / Fläche mit den Eckpunkten /u:, o:, 2: y:/) / Untere Zeile: Mittelwert KG. Der jeweils größere Mittelwert ist hervorgehoben.

Anhand der Werte von Gruppe 1 aus der Tabelle 3.8 und der Abbildung 3.3 (a) ist ersichtlich, dass der Vokalraum der CI-Gruppe größer ist als der der Kontrollgruppe. Die zwei Gruppen unterscheiden sich bei /a:/ weder in F1 noch in F2. Die anderen vier Vokale /i:, e:, o:, u:/ haben alle einen wesentlich tieferen F1-Wert. Bei /u:/ und /o:/ ist zusätzlich auch F2 tiefer. Aus diesem Grund ist der Vokalraum der CI-Träger im Gegensatz zu dem der Kontrollgruppensprecher stark nach oben und bei den tiefen hinteren Vokalen nach hinten ausgedehnt.

Bei Gruppe 2 (Abbildung 3.3 (b)) ist es umgekehrt: Die Fläche des Vokalraumes der CI-Träger ist deutlich kleiner als die der normal hörenden Kontrollgruppensprecher. Im Gegensatz zu Gruppe 1 ist die Verlagerung des Vokalraumes nach oben, vor allem

wegen des Ausreißers /i:/, trotz der tieferen F1-Werte nicht so stark ausgeprägt. Die kleinere Fläche ist hauptsächlich durch die starke Zentralisierung der F2-Werte, wegen der alle Vokale der CI-Träger näher am Neutrallaut /@/ liegen, zu erklären.

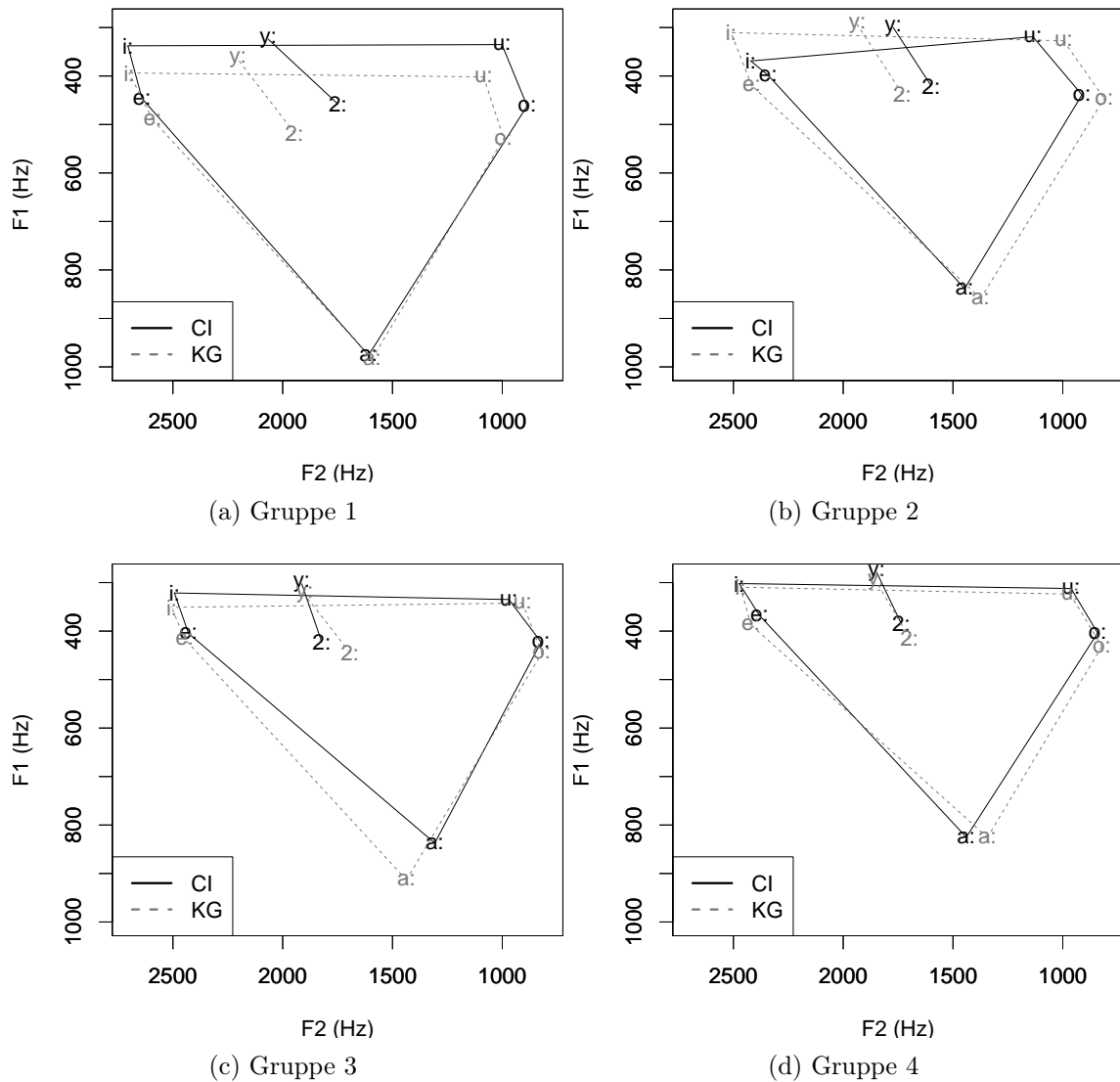


Abbildung 3.3: Paarweise Darstellung der Vokalräume der 4 CI- und KG-Gruppen.

Im Gegensatz zu den prälingual ertaubten CI-Trägern sind die Differenzen bei den Gruppen mit postlingual ertaubten Sprechern nicht ganz so groß. Die Vokalräume der Gruppen 3 und 4 unterscheiden sich vor allem durch eine Verlagerung nach oben aufgrund der tieferen F1-Werte, was aber keinen Unterschied in der Fläche der Vokalräume ausmacht.

Der Vokalraum der CI-Träger aus Gruppe 3 ist trotz der großen (signifikanten) F1- und F2-Änderung von /a:/ in Richtung Zentrum und nach hinten größer als der der zugehörigen Kontrollgruppe. Ein Grund ist der erheblich tiefere F1-Wert für /i:/.

Die Gruppe „4 CI“ hat zentralisiertere mittlere Vokale (/e:, o:/) und ein frontiertes /a:/ als ihre Kontrollgruppe „4 KG“. Dadurch ist die Fläche des Vokalraumes der CI-Träger trotz der tieferen F1-Werte bei /i:/ und /u:/ geringfügig kleiner als die der normal hörenden Sprecher. Von allen vier Gruppenpaaren unterscheiden sich die Gruppen „4 CI“ und „4 KG“ jedoch am wenigsten voneinander.

Insgesamt ist festzuhalten, dass bei den CI-Gruppen, die innerhalb von kurzer Zeit versorgt wurden (Gruppe 1 und 3), die Vokalräume der CI-Träger größer sind als die der Kontrollgruppensprecher. Bei den nach längerer Zeit versorgten CI-Trägern aus Gruppe 2 und 4 verhält es sich umgekehrt: Die Vokalräume sind kleiner als die der Kontrollgruppe. Bei den CI-Trägern aus Gruppe 2 ist der Unterschied sehr deutlich, bei Gruppe 4 dagegen eher gering.

Zusätzlich zu den Vokalräumen wurden die Flächen betrachtet, die durch die vier gerundeten Vokale /y:, u:, o:, 2:/ eingeschlossen werden. Die Flächengrößen der einzelnen Gruppen sind auch in Tabelle 3.8 eingetragen. Die Unterschiede dieser Flächen sind in Abbildung 3.4 für jede Gruppenpaarung einzeln dargestellt.

Wie bei den Flächen der Vokalräume unterscheiden sich die Gruppen mit prälingual ertaubten Sprechern (Gruppe 1 und 2) stärker von ihren Kontrollgruppensprechern als die postlingual ertaubten Sprecher (Gruppe 3 und 4). Bei den Flächen, die durch die vier gerundeten Vokale /y:, u:, o:, 2:/ definiert werden, sind bei allen vier Gruppenpaarungen die Flächen der Kontrollgruppensprecher größer als die der CI-Träger.

Bei Gruppe 1 ist die aus der Tabelle 3.8 zu entnehmende Tatsache, dass die Fläche der Kontrollgruppensprecher größer ist als die der CI-Träger, in Abbildung 3.4 (a) nicht unbedingt ersichtlich. Der Hauptunterschied ist vor allem die starke Hoch- und Rückverlagerung der Fläche der CI-Träger.

Die CI-Träger der Gruppe 2 (Abbildung 3.4 (b)) haben eine wesentlich kleinere Fläche, die von den vier gerundeten Vokalen eingeschlossen wird. Das ist vor allem auf die starke Zentralisierung der hinteren Vokale /u:/ und /o:/ und auf die Rückverlagerung der zentralen Vokale /y:/ und /2:/ zurückzuführen.

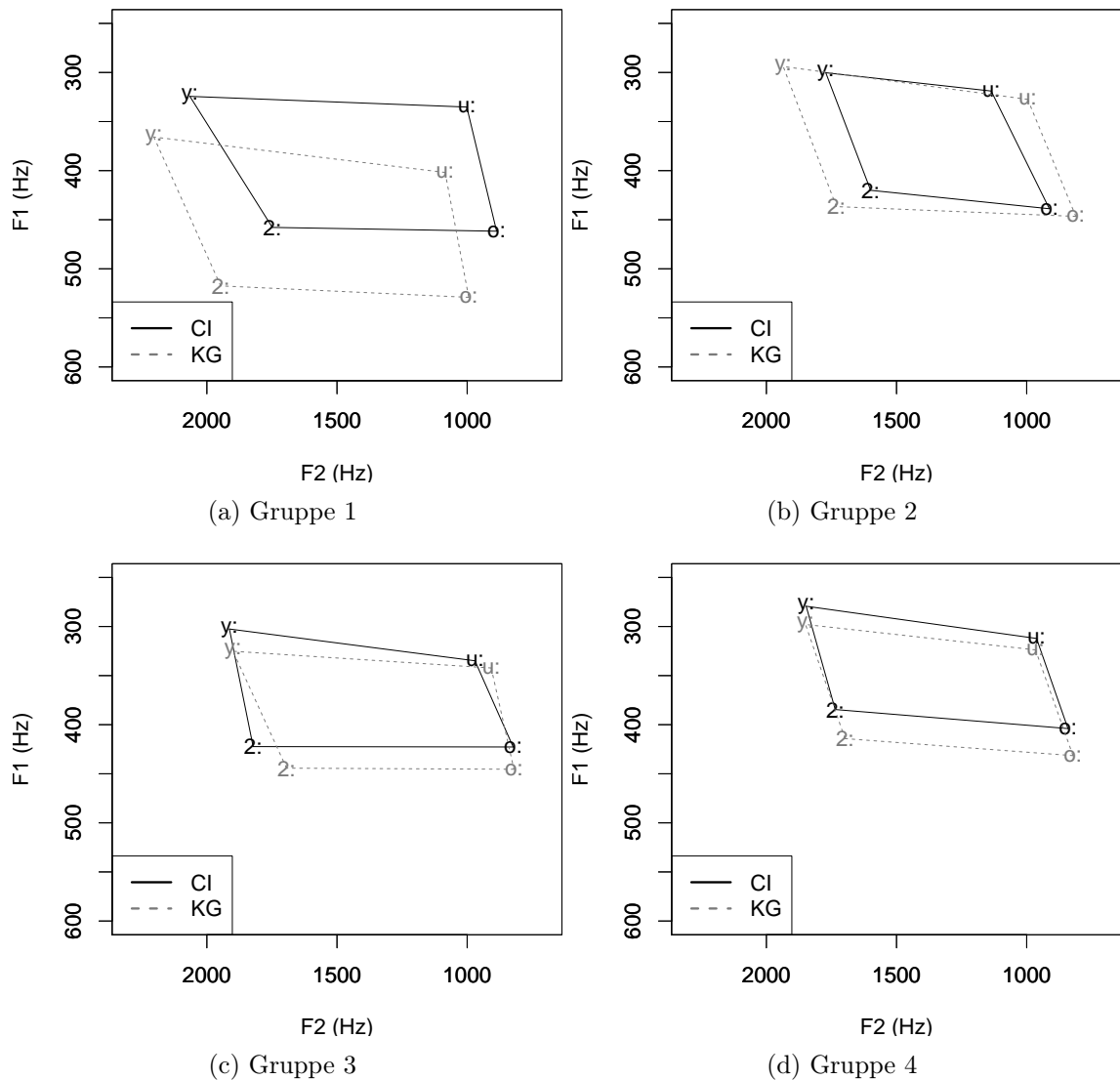


Abbildung 3.4: Paarweise Darstellung der von den vier gerundeten Vokalen /y:, u:, o:, 2:/ eingeschlossenen Flächen der 4 CI- und KG-Gruppen.

Die zwei Gruppen der postlingual ertaubten Sprecher (Gruppe 3 und 4, Abbildungen 3.4 (c) und (d)) verhalten sich wie folgt: Die von den gerundeten Vokalen eingeschlossene Fläche ist bei den Kontrollgruppensprechern größer, da der Unterschied in F1 zwischen den CI-Trägern (tiefere F1-Werte) und den normal hörenden Sprechern bei /2:/ und /o:/ größer ist als bei /y:/ und /u:/ (vor allem /u:/ von Gruppe 3). Insgesamt ist die Fläche mit den Eckpunkten /y:, u:, o:, 2:/ der CI-Träger im Gegensatz zu der der Kontrollgruppe nach oben verlagert.

## 3.2.2.6 Artikulationsbewegungskoeffizienten

Wie bei den Flächen des Vokalraumes im vorausgehenden Kapitel kann auch bei den Artikulationsbewegungskoeffizienten nur ein Wert pro Distanz für jeden Sprecher gemessen werden. Deswegen ist die Zahl der Werte in einer Gruppe zu gering für eine statistische Auswertung. Die Betrachtung dieser Ergebnisse erfolgt deshalb ebenfalls deskriptiv. Die Mittelwerte der einzelnen Distanzen sind getrennt nach Parameter und Gruppe in Tabelle 3.9 aufgelistet. Der jeweils höhere Mittelwert, der für eine längere Distanz steht, ist hervorgehoben. Der Unterschied in der Länge einer Distanz ist in Prozent angegeben. Ein positiver Wert bedeutet, dass die Distanz der CI-Träger länger ist, bei einem negativen Wert ist es umgekehrt.

	Zungenhöhe			Zungenlage		Lippenrundung	
Distanz	/i:-e:/	/y:-2:/	/u:-o:/	/y:-u:/	/2:-o:/	/i:-y:/	/e:-2:/
<b>1 CI</b>	<b>109.752</b>	134.35	<b>128.16</b>	1058.748	869.429	<b>651.728</b>	<b>902.978</b>
	12.7%	-12.9%	0.7%	-5.4%	-8.5%	31.7%	38.2%
<b>1 KG</b>	97.35938	<b>154.3229</b>	127.2188	<b>1119.021</b>	<b>950.4688</b>	494.9125	653.2917
<b>2 CI</b>	29.6276	119.7708	119.9062	635.5677	686.7292	<b>644.9271</b>	<b>743.8594</b>
	-73%	-16.1%	-1%	-32.7%	-25.3%	11.4%	8.5%
<b>2 KG</b>	<b>109.6229</b>	<b>142.6979</b>	<b>121.1099</b>	<b>943.9724</b>	<b>919.6417</b>	578.7229	685.8802
<b>3 CI</b>	<b>83.17222</b>	<b>120.0741</b>	88.49444	941.1815	<b>998.0815</b>	586.9324	610.3519
	27.2%	0.8%	-14.1%	-5.1%	14.1%	-3.2%	-19.2%
<b>3 KG</b>	65.15556	119.1019	<b>102.9667</b>	<b>991.9167</b>	875.063	<b>606.4352</b>	<b>755.4667</b>
<b>4 CI</b>	64.71611	106.205	91.81111	<b>884.1378</b>	<b>903.9694</b>	<b>628.7617</b>	643.5361
	-16.2%	-8.6%	-14.8%	0.1%	3.2%	1.3%	-10.9%
<b>4 KG</b>	<b>77.19</b>	<b>116.2389</b>	<b>107.722</b>	883.4833	876	620.5656	<b>722.4056</b>

Tabelle 3.9: Übersicht über die Ergebnisse der Artikulationsbewegungskoeffizienten. Obere Zeile: Mittelwert CI / Mittlere Zeile: Differenz der Mittelwerte der CI- und KG-Gruppe in Prozent (Positiver Wert = CI > KG = längerer bzw. negativer Wert = CI < KG = kürzerer Abstand zwischen den Vokalmittelpunkten) / Untere Zeile: Mittelwert KG. Der jeweils größere Mittelwert ist hervorgehoben.

Die Euklidischen Abstände, die dem Artikulationsbewegungskoeffizienten Zungenhöhe zugeordnet werden, stehen für die Auf- und Ab-Bewegungen der Zunge auf der vertikalen Achse. Abstände wurden zwischen den Vokalmittelpunkten einer Gruppe für /i:-e:/, /y:-2:/ und /u:-o:/ gemessen. Die Ergebnisse der drei Distanzen für die Gruppe 1 sind nicht ganz einheitlich. Die CI-Träger haben im Vergleich zu ihren Kontrollsprechern längere Distanzen zwischen /i:/ und /e:/ und zwischen /u:/ und /o:/, jedoch kürzere zwischen /y:/ und /2:/. Bei Gruppe 2 sind alle drei Distanzen der CI-Träger kürzer

als die der zugehörigen normal Hörenden. Gruppe 3 verhält sich ähnlich wie Gruppe 1: Zwei der drei Distanzen sind länger als bei der Kontrollgruppe. Der Ausreißer, der sich gegensätzlich verhält, ist die Distanz /u:-o:/. Die Distanzen der Gruppe 4 sind wie die der Gruppe 2 alle drei kürzer als die der normal hörenden Kontrollgruppe.

Zungenbewegungen auf der horizontalen Achse, im Mundraum vorne versus hinten, werden dem Artikulationsbewegungskoeffizienten Zungenlage zugeordnet. Die hierzu gemessenen Euklidischen Abstände wurden jeweils zwischen zwei gerundeten Vokalen gemessen (/y:-u:/ und /2:-o:/), um eine Senkung von F2 durch die Lippenrundung auszuschließen. Die für die Zungenlage gemessenen Euklidischen Abstände sind bei den prälingual ertaubten Sprechern (Gruppe 1 und 2) bei beiden Distanzen (/y:-u:/ und /2:-o:/) kürzer als bei der zugehörigen Kontrollgruppe. Bei den postlingual ertaubten CI-Trägern verhält es sich genau umgekehrt: Mit Ausnahme von /y:-u:/ von Gruppe 3 sind alle Euklidischen Abstände länger als die der normal hörenden Sprecher.

Auch bei der Lippenrundung sind die Ergebnisse zweigeteilt: in prä- und postlingual ertaubt. Die Euklidischen Distanzen zwischen /i:-y:/ und /e:-2:/ sind bei den Gruppen mit prälingual ertaubten Sprechern (Gruppe 1 und 2) länger als bei den Kontrollgruppen 1 und 2. Im Gegensatz dazu sind die Distanzen bei den Gruppen mit postlingual ertaubten Sprechern (Gruppe 3 und 4) mit Ausnahme von /i:-y:/ von Gruppe 4 kürzer als die der zugehörigen Gruppen mit normal hörenden Sprechern.

### 3.2.3 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Vokalanalyse im Hinblick auf die vorhandene Literatur diskutiert. Das letzte Unterkapitel 3.2.3.6 gibt sowohl einen Überblick über alle Hypothesen als auch darüber, für welche Gruppen sie angenommen wurden.

#### 3.2.3.1 Formantwerte

Die Untersuchung der **ersten Formanten** ergab für alle vier CI-Gruppen im Vergleich zu ihren jeweiligen normal hörenden Kontrollgruppen tiefere F1-Werte. Diese Ergebnisse bestätigen sowohl die Messungen von Löfqvist et al. (2010) als auch die Tendenzen von zwei Langzeitstudien: Perkell (1992) und Schenk et al. (2003). Bei diesen Studien mit schwedischen beziehungsweise amerikanisch englischen und deutschen Sprechern sind die F1-Werte über den Zeitraum der Messungen immer weiter gesunken und haben



sich somit kontinuierlich von den Werten der normal Hörenden entfernt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen dieser Studien wurden in Untersuchungen von Liker et al. (2007) und Neumeyer et al. (2010) keine Unterschiede für F1 zwischen CI-Trägern und normal hörenden Sprechern gefunden. Auch wenn die Ergebnisse für F1 für alle vier Gruppen einheitlich sind, empfiehlt es sich jedoch, die Ergebnisse für die Gruppen mit den prälingual ertaubten Sprechern getrennt von den Gruppen mit den postlingual ertaubten CI-Trägern zu betrachten:

Prälingual ertaubte CI-Träger können die Repräsentationen von Sprachlauten in der „Speech Sound Map“ (nach dem DIVA-Modell von Guenther (z.B: Guenther (2006), siehe Kapitel 2.1) nur mit eingeschränkter auditorischer Wahrnehmung anlegen. Das heißt, sie wissen nicht, wie sich die Laute mit uneingeschränktem Hörvermögen anhören und streben daher auch nicht an, sie artikulatorisch zu erreichen: In diesem Fall, Vokale so differenziert zu produzieren wie normal hörende Sprecher. Von daher spielt der physiologische Aufwand beim Sprechen eine größere Rolle als das Bestreben ein bestimmtes „artikulatorisches Ziel“ zu erreichen. Aus diesem Grund scheinen die tieferen F1-Werte aus artikulatorischer Sicht daraus zu resultieren, dass die CI-Träger beim Sprechen den Mund nicht ganz so weit öffnen (= Aufwandsreduktion).

Im Gegensatz zu den prälingual ertaubten Sprechern haben die postlingual ertaubten CI-Träger mit normalem, uneingeschränktem Hörvermögen Sprechen gelernt und haben die dabei angelegten Repräsentationen von Sprachlauten in der „Speech Sound Map“ auch nach der Ertaubung gespeichert. Daher ist davon auszugehen, dass postlingual ertaubte CI-Träger immer danach streben, sich selbst möglichst wieder so wahrzunehmen wie vor der Ertaubung beziehungsweise vor der Versorgung mit einem Cochlear Implantat. Dabei muss jedoch eine technische Eigenheit des Cochlear Implantats berücksichtigt werden: Wie in Abbildung 3.5 zu sehen ist, reicht der Elektroden-Träger nicht bis ans Ende der Cochlear. Wie lang der Elektroden-Träger ist, ist abhängig vom Hersteller. Das heißt, dass nicht mehr der ganze Bereich von Nervenendungen des Hörnervs stimuliert werden kann und die tiefen Töne (die an der Spitze der Schnecke stimuliert werden) jetzt in einem eigentlich viel höheren Frequenzbereich angeregt werden - am Ende des Elektroden-Trägers. Gleichzeitig ist der Frequenzbereich, der stimuliert wird, stark gestaucht. Daraus resultiert für den CI-Träger, dass er seine eigenen Formantfrequenzen höher wahrnimmt als vor der CI-Versorgung. Um das zu kompensieren, senken postlingual ertaubte Sprecher ihre Frequenzen, was durch die tieferen F1-Werte im Vergleich zu denen der zugehörigen normal hörenden Sprecher in dieser Studie bestätigt wurde.

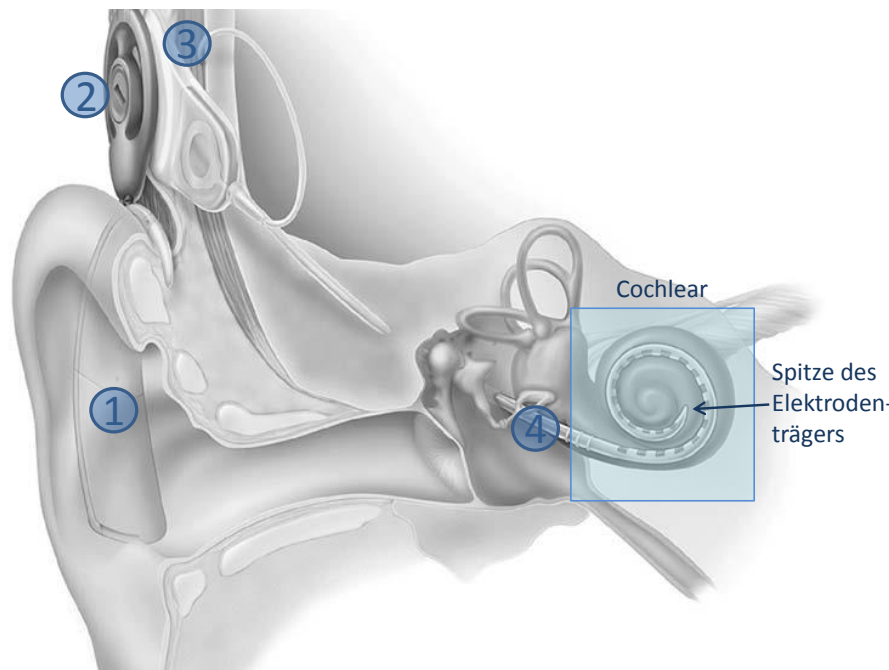


Abbildung 3.5: Lage eines Cochlear Implantates: 1: Soundprozessor / 2: Sendespule / 3: Empfänger/Stimulator / 4: Elektroden-träger. Blau hervorgehoben: Cochlear (beziehungsweise Hörschnecke) mit innenliegendem Elektroden-träger. (Abbildung aus Wintermantel & Ha (2008) übernommen und ergänzt.)

Für den **zweiten Formanten** wurde kein eindeutiger Trend für alle vier CI-Gruppen gefunden. Bei Gruppe 1 wurden für die gerundeten Vokale durchgehend tiefere F2 Werte gemessen, was einer Rückverlagerung des Vokalraumes entspricht. Erklären lässt sich dies dadurch, dass die CI-Träger der Gruppe 1 ihre Lippen bei den gerundeten Vokalen übermäßig stark runden. Der Zusammenhang zwischen der Rückverlagerung des Vokalraumes und der Lippenrundung gestaltet sich folgendermaßen: F2 korreliert mit der Lage der Zunge im Mund. Je weiter die Zunge im Mund nach hinten verschoben wird, umso tiefer ist F2. Durch die Verlängerung des Ansatzrohres verschiebt sich die Zungenposition relativ gesehen nach hinten, was zur Absenkung von F2 führt (Sevens (1998)). Der Erklärungsansatz, dass die CI-Träger der Gruppe 1 ihre Lippen bei gerundeten Vokalen extremer runden, steht auch im Einklang mit den Resultaten der Untersuchung der Artikulationsbewegungskoeffizienten: Die Distanzen zwischen /i:-y:/ und /e:-2:/ sind bei den CI-Trägern deutlich länger als bei ihrer Kontrollgruppe. Die Ergebnisse für Gruppe 1 stehen jedoch in Kontrast zu denen einer Studie von Liker et al. (2007), die in einer Langzeitstudie mit 18 kroatischen Kindern über den Zeitverlauf eine deutliche Frontierung des Vokalraumes, also höhere F2-Werte im Vergleich zu normal hörenden Sprechern, gemessen haben.

Gruppe 2 hat durch ihre F2-Werte im Vergleich zu ihren normal hörenden Kontrollgruppensprechern einen stark zentralisierten beziehungsweise kleineren Vokalraum. Das bestätigt die erste Hypothese, dass CI-Träger im Vergleich zu ihren Kontrollgruppensprechern einen signifikant kleineren Vokalraum haben. Es lässt sich dadurch erklären, dass diese prälingual ertaubten CI-Träger, die erst nach längerer Zeit mit einem CI versorgt wurden, in der Spracherwerbsphase nur ein sehr stark eingeschränktes Hörvermögen hatten. Sie nahmen Vokale in dieser Zeit nicht sehr differenziert wahr und dementsprechend sind auch die Repräsentationen der Laute, die in der Spracherwerbsphase angelegt werden und die laut DIVA-Modell in der „Speech Sound Map“ gespeichert sind, wenig differenziert. Da angestrebt wird, diese Repräsentationen in der eigenen Sprachproduktion umzusetzen, produzieren die CI-Träger der Gruppe 2 Vokale, die sich weniger stark unterscheiden beziehungsweise aus akustischer Sicht näher am Neutrallaut /@/ liegen als bei normal Hörenden. Diese Ergebnisse der Gruppe 2, signifikant unterschiedliche F2 Werte und ein kleinerer Vokalraum, sind konsistent mit den Ergebnissen von Neumeyer et al. (2010).

Im Gegensatz dazu wurde bei einer Studie von Perkell (1992) mit größtenteils postlingual ertaubten CI-Trägern kein eindeutiger Trend für die Ergebnisse von F2 gefunden. Das entspricht den Ergebnissen für die postlingual ertaubten CI-Träger der Gruppen 3 und 4. Konsistent mit den Ergebnissen der Gruppe 4 wurden in Untersuchungen von Schenk et al. (2003) und Löfqvist et al. (2010) mit postlingual ertaubten CI-Trägern keine Unterschiede für F2 gemessen.

Für die Ergebnisse von F2 im Vergleich zu normal hörenden Sprechern scheint es im Hinblick darauf, ob die Unterschiede signifikant sind und einen klaren Trend aufweisen, eine große Rolle zu spielen, ob CI-Träger prälingual ertaubt sind oder postlingual. Für F2 wird auf jeden Fall die sechste Hypothese bestätigt, dass die Unterschiede für prälingual ertaubte Sprecher, die erst nach längerer Zeit versorgt wurden, am größten sind.

### 3.2.3.2 Grundfrequenz

Auch die Ergebnisse der Grundfrequenzanalyse unterstreichen den Ansatz, prälingual ertaubte CI-Träger getrennt von postlingual ertaubten zu betrachten. Die F0-Werte verhalten sich im Vergleich zu den normal hörenden Sprechern genau konträr. Prälingual ertaubte CI-Träger haben höhere F0-Werte als ihre zugehörigen Kontrollgruppensprecher. Der Grund dafür könnte eine schlechtere Kontrolle beziehungsweise ein zu großer subglottaler Druck sein. Dieses Phänomen wurde bei Hörgeschädigten in der Literatur häufiger beobachtet: siehe zum Beispiel Binnie et al. (1982), Leder et al. (1987) und Leder & Spitzer (1993). Der subglottale Druck (und somit auch F0) wird jedoch

nach einer CI-Versorgung in der Regel kleiner, wie in Studien von Leder & Spitzer (1990) und Oster (1987) berichtet wird. Im Gegensatz zu den hohen Grundfrequenzwerten der prälingual ertaubten CI-Träger sind die F0-Werte der postlingual ertaubten Sprecher niedriger als die der normal hörenden Sprecher. Das stimmt mit Ergebnissen von Schenk et al. (2003) überein, die in einer Langzeitstudie mit deutschen postlingual ertaubten CI-Trägern eine kontinuierliche Absenkung von F0 beobachteten. Die tiefen F0-Werte sind genau wie die tiefen F1-Werte dadurch zu erklären, dass sich die postlingual ertaubten CI-Träger aufgrund der Lage des Elektrodenträgers in der Cochlear mit höheren Formanten wahrnehmen als vor der CI-Versorgung und versuchen, dies durch eine Absenkung der Frequenzen zu kompensieren.

Diese durchgängige Kompensation steht auch im Einklang mit dem DIVA-Modell von Guenther (Guenther (1995), Guenther et al. (1998), Guenther et al. (2006)), nach dem die eigene Sprachproduktion, der akustische (und somatosensorische) „Ist-Zustand“ in der „Auditory State Map“, ständig mit den gespeicherten Repräsentationen der Vokale in der „Speech Sound Map“ abgeglichen wird. Wenn die Selbstwahrnehmung, wie im Fall der postlingual ertaubten CI-Träger, von der „Speech Sound Map“ abweicht und sie sich selbst mit zu hoher Grundfrequenz wahrnehmen, wird diese Abweichung in der „Auditory Error Map“ gespeichert und durch die Artikulationsgeschwindigkeit und vor allem durch die Position der Artikulatoren („Articulatory Velocity and Position Maps“) ausgeglichen. In diesem Fall werden die Frequenzen F0 und F1 abgesenkt. Diese Ergebnisse stehen allerdings in Kontrast zur fünften Hypothese, dass sich die postlingual ertaubten CI-Träger weniger von der Kontrollgruppe unterscheiden, vor allem wenn sie schnell mit einem CI versorgt wurden. Es macht eher den Anschein, je präsenter die abgespeicherten Repräsentationen in der „Speech Sound Map“ von vor der Ertaubung sind, umso stärker wird kompensiert beziehungsweise umso unsicherer sind die Sprecher.

Diese Unsicherheit der CI-Träger aus Gruppe 3 spiegelt sich auch in den Ergebnissen der Interquartilsabstände, die Aufschluss über die intrinsische Dynamik eines Vokals geben, wider. Höhere Werte entsprechen einer größeren Dynamik innerhalb eines Vokals und somit einer schlechteren Kontrolle der Artikulatoren. Gruppe 3 hat im Gegensatz zu Gruppe 4 meistens höhere Werte. Auch die prälingual ertaubten Sprecher weisen bei den meisten Vokalen höhere Werte auf. Die prälingual ertaubten Sprecher scheinen außerdem bei F2 mehr Probleme zu haben als bei F1 - das ist eine Tendenz, die bei den Ergebnissen dieser Studie allgemein zu beobachten ist. Summers & Leek (1992) haben in einer Studie von 1992 untersucht, welche spektralen und temporalen Merkmale für die Sprachwahrnehmung von Hörgeschädigten entscheidend sind. Sie haben herausgefunden, dass F2 ein Merkmal der Sprache ist, auf das sich Hörgeschädigte in ihrer Sprachwahrnehmung nur sehr wenig stützen.

### 3.2.3.3 Artikulationsbewegungskoeffizienten

Diese Tendenz ist auch bei den Artikulationsbewegungskoeffizienten zu sehen: Die prälingual ertaubten Sprecher haben bei den Distanzen zwischen Vokalen, die sich durch die Zungenlage unterscheiden (was F2 zuzuordnen ist) kürzere Abstände als ihre Kontrollgruppensprecher. Dieses Ergebnis bestätigt für die prälingual ertaubten CI-Träger die dritte Hypothese, dass CI-Träger im Vergleich zu normal Hörenden signifikant kürzere Distanzen zwischen Vokalen produzieren, die sich durch die Zungenlage unterscheiden, und ist dadurch zu erklären, dass die Zungenbewegungen in der horizontalen Ebene von außen nicht absehbar sind. Somit können CI-Träger die motorischen Gesten kaum bei anderen Sprechern absehen und nachahmen. Dass sich Hörgeschädigte beim Sprechen insgesamt mehr auf die visuelle Information stützen als auf die akustische, wurde von Walden et al. (1990) nachgewiesen. Die Distanzen der postlingual ertaubten Sprecher sind ähnlich lang bis länger als die der normal Hörenden. Die zum Teil längeren Distanzen zwischen den Vokalen sind durch das Bestreben der postlingual ertaubten CI-Träger, genauso deutlich zu artikulieren wie vor ihrem Hörverlust, zu erklären.

Die Distanzen zwischen Vokalen, die sich durch die Lippenrundung unterscheiden, sind bei den prälingual ertaubten CI-Trägern wesentlich länger. Eine Erklärung dafür ist, dass sich Vokale wie /i:/ und /y:/ eben nicht nur durch die reine Lippenrundung unterscheiden, sondern auch durch kleine Zungenbewegungen, die durch die Rundung aber nicht absehbar sind. Sprecher, die sich stark auf Absehbarkeit und Nachahmung stützen, was bei prälingual ertaubten CI-Trägern oft der Fall ist, versuchen dann stattdessen, durch eine übermäßige Lippenrundung das artikulatorische Ziel zu erreichen. Durch die starke Lippenrundung sinkt F2. Im Gegensatz zu den prälingual ertaubten Sprechern sind die Distanzen der postlingual ertaubten CI-Träger kürzer als die der Kontrollgruppensprecher. Somit wird die vierte Hypothese, dass Distanzen zwischen Vokalen, die sich durch die Lippenrundung unterscheiden, bei CI-Trägern kürzer sind als bei normal hörenden Sprechern, für die postlingual ertaubten CI-Träger bestätigt.

Bei den Distanzen, die sich durch die Zungenhöhe (korreliert mit F1) unterscheiden, erfolgte die Aufteilung der Ergebnisse auf die vier Gruppen nicht in prälingual und postlingual, sondern in kurze und lange Zeit zwischen Ertaubung und Versorgung. Bei Gruppe 1 und 3 sind jeweils zwei der drei Distanzen länger als die der Kontrollgruppe. Die Distanzen der Gruppen 2 und 4 sind durchgehend kürzer als die der zugehörigen Kontrollgruppensprecher. Bei Gruppe 2 ist das durch den kleineren Vokalraum zu begründen, in dem die Vokale nicht so weit auseinanderliegen und somit auch die Abstände zwischen den einzelnen Lauten nicht so groß sind.

### 3.2.3.4 Vokalräume

Bei den Ergebnissen der Flächen der Vokalräume (Fünfeck) verhält es sich ähnlich: Die Vokalräume der Gruppe 1 und 3 sind größer als die ihrer Kontrollgruppen. Der Vokalraum von Gruppe 2 ist deutlich kleiner als der der zugehörigen normal hörenden Sprecher und Gruppe 4 unterscheidet sich kaum von ihrer Kontrollgruppe. Somit wird die erste Hypothese, dass CI-Träger einen signifikant kleineren Vokalraum haben als ihre zugehörigen Kontrollgruppensprecher, nur für Gruppe 2 bestätigt.

Die Flächen (Vierecke) mit den gerundeten Vokalen /y:, u:, 2:, o:/ als Eckpunkte bestätigen alle vorherigen Ergebnisse beziehungsweise die Effekte sind sogar noch ausgeprägter zu beobachten. Die Flächen sind durch die tieferen F1-Werte im Vergleich zur jeweiligen Kontrollgruppe stark nach oben verlagert. Bei Gruppe 1 ist außerdem noch die Rückverlagerung dieser Fläche der gerundeten Vokale zu beobachten. Die Zentralisierung, die bei Gruppe 2 im gesamten Vokalraum zu sehen ist, tritt auch bei den gerundeten Vokalen auf. Außerdem sind diese Flächen mit den gerundeten Vokalen als Eckpunkte bei allen vier CI-Gruppen kleiner als bei den normal hörenden Kontrollgruppen. Insgesamt kann man nach Betrachtung aller Ergebnisse sagen, dass CI-Träger, vor allem die der Gruppe 1, sich bei der Produktion von gerundeten Vokalen verstärkt von normal hörenden Sprechern unterscheiden.

### 3.2.3.5 Relative Vokaldauern

Zusätzlich zu den spektralen Merkmalen wurde als temporales Merkmal auch die relative Vokaldauer gemessen. Bei den prälingual ertaubten Sprechern sind die relativen Vokaldauern überwiegend kürzer als die der Kontrollgruppensprecher. Vor allem bei Gruppe 2 lässt sich das dadurch erklären, dass sie bei der Sprachproduktion keine stark differenzierten artikulatorischen Ziele (Vokale) erreichen. In den Vokalräumen der Sprecher dieser Gruppe liegen die Vokale sehr nah beieinander, somit sind auch die Zungenbewegungen nicht groß und nehmen nicht so viel Zeit in Anspruch. Das gilt auch für die geringere Mundöffnung, die sowohl bei Gruppe 1 als auch bei Gruppe 2 vermutet wurde (niedrige F1-Werte). Im Gegensatz dazu sind die relativen Vokaldauern bei den postlingual ertaubten CI-Trägern (der Gruppe 4) länger als die der normal hörenden Sprecher. Dieses Ergebnis ist konsistent mit denen von Neumeyer et al. (2010) und Vandam et al. (2011). Die längeren relativen Vokaldauern der postlingual ertaubten Sprecher dieser Studie sind eventuell darin begründet, dass die CI-Träger hyperartikulieren, um die in der „Speech Sound Map“ gespeicherten Repräsentationen zu erreichen. Das würde eigentlich höhere F1-Werte zur Folge haben, die jedoch aus oben genannten Gründen kompensiert werden.

## 3.2.3.6 Überblick Hypothesen

		Gruppe			
		1	2	3	4
01	Der Vokalraum von CI-Trägern ist kleiner als der der normal hörenden Kontrollgruppensprecher.	x	✓	x	x
02	Es gibt keine Unterschiede zwischen CI-Trägern und den Kontrollgruppensprechern bei Distanzen zwischen Vokalen, die sich durch die <b>Zungenhöhe</b> unterscheiden.	x	x	x	x
03	CI-Träger produzieren im Gegensatz zu normal Hörenden kürzere Distanzen zwischen den Vokalen, die sich durch die <b>Zungenlage</b> (vorne vs. hinten) unterscheiden.	✓	✓	x	x
04	<b>Lippenrundung:</b> Distanzen zwischen ungerundeten und gerundeten Vokalen (z.B. /i:-y:/) sind bei CI-Trägern kürzer als bei normal Hörenden.	x	x	✓	✓
05	Postlingual ertaubte CI-Träger, die zeitnah mit einem CI versorgt wurden, weisen im Vergleich zu den normal Hörenden die kleinsten beziehungsweise keine Unterschiede auf.	–	–	x	–
06	Die Gruppe der prälingual ertaubten CI-Träger, die spät versorgt wurden, weist im Vergleich zu ihrer normal hörenden Kontrollgruppe die größten Unterschiede auf.	–	✓	–	–

Tabelle 3.10: Übersicht über die Hypothesen der Vokalanalyse.

### 3.3 Langzeitstudie

Im vorangehenden Kapitel 3.2 ist eines der Einschlusskriterien für die CI-Träger, dass sie seit mindestens einem Jahr mit einem Cochlear Implantat versorgt sind. Damit soll ausgeschlossen werden, dass ein Sprecher, der noch nicht die optimale Sprachkompetenz nach seiner CI-Versorgung erreicht hat, sich nur aufgrund dieser Tatsache von normal hörenden Sprechern unterscheidet. Es ist jedoch nicht nur der „Ist-Zustand“ eines CI-Trägers im Vergleich mit normal hörenden Sprechern interessant, sondern auch die Veränderungen in der Sprachproduktion eines CI-Trägers von der CI-Versorgung bis zu einem Jahr danach. Diese Entwicklung soll im Folgenden anhand einer Langzeitstudie, die in der Methode mit der vorherigen Studie vergleichbar ist, untersucht werden.

#### 3.3.1 Methode

##### 3.3.1.1 Sprecher

An dieser Langzeitstudie haben insgesamt drei Sprecher teilgenommen. Sie wurden aus einer Vielzahl von Sprechern, die an der Klinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde am Klinikum Großhadern in München aufgenommen wurden, ausgewählt. Das Hauptkriterium war, dass alle Aufnahmesitzungen von der Aktivierung des Sprachprozessors bis ein Jahr nach der OP vollständig vorhanden waren. Auch wenn die Sprecher nicht direkt miteinander verglichen wurden, sollten die Unterschiede in den Metadaten so gering wie möglich gehalten werden (Metadaten siehe Tabelle 3.11): Es haben nur männliche Sprecher zwischen 50 und 60 Jahren teilgenommen, die alle drei postlingual ertaubt sind.

VPN-Nummer	Geschlecht	Alter	Alter bei Ertaubung	Dauer ohne CI	Art der Versorgung
<b>7T</b>	m	59	56	3	unilateral
<b>7X</b>	m	51	40	11	unilateral
<b>8A</b>	m	53	40	13	unilateral

VPN-Nummer	Ursache der Ertaubung	progrediente Ertaubung	CI-Hersteller	Implantat-typ	Kodierungsstrategie
<b>7T</b>	Hörstürze	ja	Med-El	Concerto Flex 28	FS24
<b>7X</b>	Hörsturz	nein	Med-El	Concerto Flex 28	FS24
<b>8A</b>	Hörsturz	ja	Med-El	Concerto Flex 28	FS24

Tabelle 3.11: Übersicht über die Sprecher der Langzeitstudie.



Alle drei wurden unilateral mit demselben CI-Modell von Med-El versorgt und verwenden dieselbe Kodierungsstrategie. Bei allen drei Sprechern beginnt das niedrigste Frequenzband bei 100Hz und endet das höchste bei 8500Hz. Der einzige Unterschied ist, dass der Sprecher 7T nach einer viel kürzeren Zeit nach Ertaubung mit einem CI versorgt wurde als die anderen beiden Sprecher (3 Jahre vs. 10 beziehungsweise 11 Jahre). Da bei dieser Studie nur die einzelnen Aufnahmesitzungen eines jeweiligen Sprechers verglichen wurden, gibt es zu diesen CI-Trägern keine normal hörenden Kontrollsprecher.

### 3.3.1.2 Sprachmaterial

Die Langzeitstudie soll in der Methode mit der vorangehenden Studie, dem Vergleich zwischen CI-Trägern und normal hörenden Sprechern, kompatibel sein. Deswegen wurde hier dasselbe Sprachmaterial verwendet, das bereits in Kapitel 3.2.1.2 beschrieben wurde. Es gibt nur zwei wesentliche Unterschiede:

Erstens wurde das Trägerwort für /i:/ ausgetauscht. Wie ebenfalls in Kapitel 3.2.1.2 ausgeführt, wurde von dem Wort „Titel“ oft nur eine Dialektvariante mit einem Kurzvokal statt einem Langvokal gelesen. Stattdessen wurde in der Langzeitstudie das Wort „Dieter“ aufgenommen, obwohl der wortinitiale Plosiv im Gegensatz zu allen anderen Trägerwörtern stimmhaft ist.

Der zweite Unterschied ist, dass aufgrund des viel umfangreicheren Datenmaterials, das in Großhadern aufgenommen wurde, um allen Beteiligten der Kooperation gerecht zu werden (Beschreibung siehe Kapitel 2.2), jeder Satz nur fünfmal wiederholt wurde.

### 3.3.1.3 Datenerhebung

Die Sprachaufnahmen für diese Langzeitstudie wurden wie in Kapitel 2.3 beschrieben am Klinikum Großhadern durchgeführt. Die Sprecher dieser Langzeitstudie wurden zu folgenden Zeitpunkten ihrer CI-Versorgung aufgenommen:

- **prä Aktivierung:** 1-3 Tage nach OP beziehungsweise am Tag der Sprachprozessoraktivierung
- **1 Monat:** 1 Monat nach Aktivierung des Sprachprozessors
- **3 Monate:** 3 Monate nach Aktivierung des Sprachprozessors
- **6 Monate:** 6 Monate nach Aktivierung des Sprachprozessors
- **1 Jahr:** bei der ersten Jahreskontrolle

### 3.3.1.4 Datenbearbeitung und -auswertung

Die Bearbeitung der Daten und auch die Auswertung der einzelnen untersuchten Parameter entsprechen dem Verfahren der vorangehenden Studie. Beides ist in Kapitel 3.2.1.3 beschrieben.

Ein wesentlicher Unterschied liegt jedoch in der Statistik: In dieser Langzeitstudie werden nur einzelne Aufnahmesitzungen eines jeweiligen Sprechers verglichen. Da aufgrund dieses Verfahrens zu wenig Datenpunkte vorliegen, ist keine statistische Berechnung der Unterschiede möglich. Die Ergebnisse dieser Studie werden daher im Folgenden deskriptiv ausgewertet.

## 3.3.2 Ergebnisse

### 3.3.2.1 Formantwerte

Die Ergebnisse der Langzeitstudie für F1 sind in Tabelle 3.12 getrennt nach Sprechern aufgeführt. Für jeden einzelnen Vokal ist zu jedem Messzeitpunkt beziehungsweise zu jeder Aufnahmesitzung der Mittelwert aller Wiederholungen des Vokals eingetragen. In der letzten Spalte ist die Änderung der Mittelwerte von „prä Aktivierung“ bis „1 Jahr nach OP“ in Prozent angegeben. Ein positiver Wert steht für höhere Formantwerte nach einem Jahr CI-Tragedauer im Vergleich zu vor der Aktivierung des Sprachprozessors, ein negativer Wert für niedrigere Formantwerte. In Abbildung 3.7 ist die Verschiebung der Vokale im Vokalraum von vor der Aktivierung des Sprachprozessors zu nach einem Jahr CI-Tragedauer getrennt nach Sprechern abgebildet.

Sprecher-Nr.	Vokal	prä Aktivierung	1 Monat	3 Monate	6 Monate	1 Jahr	prä Akt. vs. 1 Jahr
<b>F1</b>							
7T	/a:/	619.8	604	578.7	581	558.6	−11%
	/e:/	336.6	346.8	331.4	350.4	360.8	6.7%
	/i:/	291.1	283.8	280.2	286.6	297.5	2.2%
	/o:/	345.4	378.1	361.8	386.1	367.5	6%
	/u:/	262.1	306.7	287.4	307.2	318	17.6%
	/y:/	287.8	305.5	287.3	294	307.1	6.3%
	/2:/	354	393	358.8	390.8	375.6	5.8%
7X	/a:/	569.7	551.4	561.6	571.7	571	0.2%
	/e:/	290.9	282	287.8	296.4	290.6	−0.1%
	/i:/	262.3	275.6	272	258.8	286.8	9.3%
	/o:/	325.3	330.8	320.6	325.2	346.2	6.4%
	/u:/	284.8	300.5	293.8	290.8	308.8	8.4%
	/y:/	266	277	272.4	273.1	285.4	7.3%
	/2:/	317.7	313.5	314.9	318.9	320.7	0.9%

8A	/a:/	631	634.7	666	638.5	640.2	1.5%
	/e:/	301.2	295.5	301.4	298.2	300.4	-0.3%
	/i:/	267.9	265.2	292.7	269.4	274.2	2.4%
	/o:/	353.1	355.2	383.7	388.7	375.7	6.4%
	/u:/	277.4	279	290.1	278.1	280.3	1%
	/y:/	250.8	258.2	268.6	268.8	255.2	1.8%
	/2:/	322	319.6	329	335.1	321.9	-0.03%
<b>F2</b>							
7T	/a:/	1194.3	1273.6	1277.1	1211.1	1238.3	3.7%
	/e:/	1893.1	2108.2	2025.9	1860.7	1850.2	-2.3%
	/i:/	1949.7	2015.7	2109.9	1919.8	1934.6	-0.8%
	/o:/	735.8	780.5	831.3	802.5	874.4	18.8%
	/u:/	795.8	924.1	888.5	937.7	978.3	23%
	/y:/	1248.8	1466.7	1570.2	1505.3	1490.1	19.3%
	/2:/	1340.9	1388.7	1442.4	1406.2	1369	2.1%
7X	/a:/	1055.8	1092.4	1100.1	1104.5	1093.1	3.5%
	/e:/	2058.7	2021.3	1996.8	2017.8	2030.9	-1.4%
	/i:/	2044.6	2012.2	1993.5	2058	1939.6	-5.1%
	/o:/	739.6	777.4	762.4	740.2	796.2	7.7%
	/u:/	915.7	987.9	959.5	950	985.5	7.6%
	/y:/	1715.7	1709.1	1717.1	1727.5	1736.1	1.2%
	/2:/	1627.5	1617.2	1618.5	1623.7	1619.6	-0.5%
8A	/a:/	1012.5	1036.5	1060.1	1100.1	1020.6	0.8%
	/e:/	1988.4	1984.2	1980.5	2067.5	1953.8	-1.7%
	/i:/	1957.7	1894.1	1889.1	1927.5	1802.1	-7.9%
	/o:/	705.4	780.3	788.2	791	749	6.2%
	/u:/	826.8	902.7	938.4	874.4	840.8	1.7%
	/y:/	1658.9	1643.9	1687.2	1685.1	1604.8	-3.3%
	/2:/	1530.8	1504.2	1565	1558.3	1531.4	0.04%

Tabelle 3.12: Ergebnisse für F1 (oben) und F2 (unten): Mittelwerte der Formantwerte pro Vokal getrennt nach Aufnahmeterminen. Letzten Spalte: Änderung der Mittelwerte von F1 bzw. F2 von der Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors zu der nach einem Jahr CI-Tragedauer erfolgten Aufnahme in Prozent. Positiver Wert: F1/F2-Werte sind gestiegen / negativer Wert: F1/F2-Werte sind gesunken.

Die Werte des ersten Formanten F1 stiegen bei allen drei Sprechern durchgehend von der ersten Aufnahme vor der Aktivierung des Sprachprozessors bis zur letzten Aufnahme ein Jahr nach der OP. Ausnahmen bilden /a:/ von Sprecher 7T, /e:/ von Sprecher 7X und /e:/ und /2:/ von Sprecher 8A. Das Ausmaß der Änderungen ist der letzten Spalte der Tabelle 3.12 zu entnehmen.

Auch für die F2-Werte lässt sich ein eindeutiger Trend zwischen der Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors und der Aufnahme ein Jahr nach OP erkennen: Die F2-Werte der vorderen hohen Vokale /i:/ und /e:/ sind bei der letzten Aufnahmesitzung tiefer als bei der ersten. Bei allen anderen Vokalen ist es umgekehrt: Die F2-Werte sind ein Jahr nach der OP höher als vor Aktivierung des Sprachprozessors. Ausnahmen sind /2:/ von Sprecher 7X und /y:/ von Sprecher 8A.

### 3.3.2.2 Grundfrequenz

Die gemessenen Grundfrequenzwerte sind in Tabelle 3.13 aufgeführt und visuell in Abbildung 3.6 dargestellt.

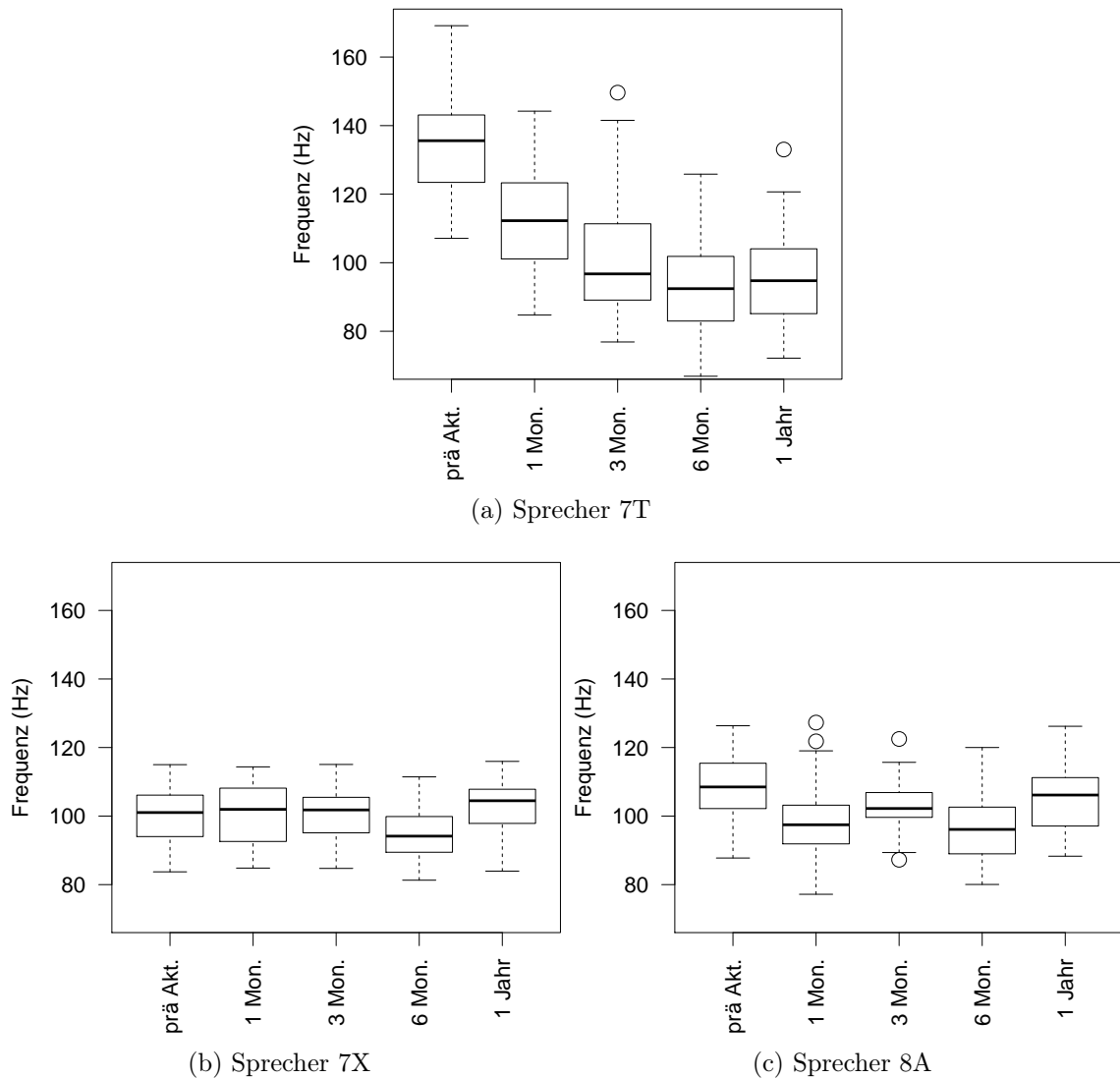


Abbildung 3.6: Ergebnisse für F0 getrennt nach Sprechern.

Wie man anhand der letzten Spalte der Tabelle 3.13, der Änderung der Mittelwerte von der ersten Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors bis zur letzten Aufnahme ein Jahr nach der OP in Prozent, ablesen kann, verhalten sich die drei Sprecher die Grundfrequenz betreffend sehr unterschiedlich. Sprecher 7T hat nach einem Jahr durchgehend tiefere F0-Werte als bei der ersten Aufnahmesitzung. Auch die Werte von Sprecher 8A sind ein Jahr nach Prozessoraktivierung mit Ausnahme von /o:/ gesunken. Im Gegensatz dazu sind die F0-Werte von Sprecher 7X mit Ausnahme von /y:/

durchgehend leicht gestiegen. Aus Abbildung 3.6 ist ersichtlich, dass die Werte von Sprecher 7T kontinuierlich fallen, bei Sprecher 7X annähernd gleich bleiben und bei Sprecher 8A stark schwanken.

Sprecher-Nr.	Vokal	prä Aktivierung	1 Monat	3 Monate	6 Monate	1 Jahr	prä Akt. vs. 1 Jahr
7T	/a:/	112.692	93.983	84.235	80.587	79.207	−29.7%
	/e:/	130.975	103.183	90.062	87.934	89.542	−31.6%
	/i:/	139.445	121.388	108.017	105.958	103.53	−25.8%
	/o:/	132.513	111.011	94.761	88.155	93.058	−30%
	/u:/	148.086	119.95	115.638	96.667	97.373	−34.2%
	/y:/	154.425	128.107	115.597	128.275	105.58	−31.6%
	/2:/	132.432	111.306	95.701	92.801	96.639	−27%
7X	/a:/	86.27	87.759	86.774	83.654	86.5	0.3%
	/e:/	92.769	91.481	94.294	87.378	98.179	5.8%
	/i:/	105.316	107.237	103.629	97.252	106.426	1.1%
	/o:/	98.386	98.514	99.519	94.919	99.103	0.7%
	/u:/	104.937	109.532	107.825	101.683	108.435	3.3%
	/y:/	112.412	109.028	108.456	103.283	111.219	−1.1%
	/2:/	99.47	100.405	99.522	95.327	105.128	5.7%
8A	/a:/	92.742	84.786	91.839	81.713	91.206	−1.7%
	/e:/	104.495	95.275	100.272	91.882	103.52	−0.9%
	/i:/	111.19	99.67	102.203	91.857	101.527	−8.7%
	/o:/	105.61	98.182	102.041	99.759	107.768	2%
	/u:/	121.504	111.013	115.28	107.211	112.469	−7.4%
	/y:/	117.484	107.352	109.43	106.076	111.299	−5.3%
	/2:/	106.808	94.593	102.279	96.035	105.808	−0.9%

Tabelle 3.13: Ergebnisse der Grundfrequenz F0: Mittelwerte der F0-Werte pro Vokal getrennt nach Aufnahmeterminen. Letzte Spalte: Änderung der Mittelwerte von F0 von der Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors zu der nach einem Jahr CI-Tragedauer erfolgten Aufnahme in Prozent. Positiver Wert: F0-Werte sind gestiegen / negativer Wert: F0-Werte sind gesunken.

### 3.3.2.3 Relative Vokaldauern

Wie bei der Grundfrequenz verhalten sich auch die Tendenzen und Werte für die relativen Vokaldauern (V%-Dauern) für die einzelnen Sprecher unterschiedlich. Wie aus der letzten Spalte in Tabelle 3.14 ersichtlich ist, sind die relativen Vokaldauern von Sprecher 7T mit Ausnahme von /i:/ und /o:/ nach einem Jahr CI-Tragedauer länger als vor Aktivierung des Sprachprozessors. Auch bei Sprecher 7X sind die relativen Vokaldauern bei der letzten Aufnahme überwiegend länger als bei der ersten (/a:, i:/ und /2:/ sind kürzer). Sprecher 8A weist gegenteilige Tendenzen auf: Bei sechs der sieben Langvokale sind die relativen Vokaldauern ein Jahr nach Aktivierung des Sprachprozessors kürzer als vor der Aktivierung. Nur /i:/ bildet eine Ausnahme.

Sprecher-Nr.	Vokal	prä Aktivierung	1 Monat	3 Monate	6 Monate	1 Jahr	prä Akt. vs. 1 Jahr
7T	/a:/	0.272	0.28	0.297	0.273	0.287	5.4%
	/e:/	0.194	0.222	0.226	0.177	0.231	19.4%
	/i:/	0.246	0.23	0.232	0.202	0.223	-9.6%
	/o:/	0.267	0.264	0.249	0.291	0.264	-1.2%
	/u:/	0.231	0.242	0.251	0.238	0.246	6.8%
	/y:/	0.248	0.24	0.256	0.236	0.26	4.8%
	/2:/	0.222	0.236	0.215	0.246	0.367	6.2%
7X	/a:/	0.367	0.323	0.315	0.331	0.321	-12.6%
	/e:/	0.202	0.207	0.216	0.227	0.211	4.4%
	/i:/	0.263	0.236	0.216	0.204	0.22	-16.4%
	/o:/	0.285	0.262	0.278	0.299	0.327	14.8%
	/u:/	0.257	0.234	0.251	0.261	0.27	5.2%
	/y:/	0.229	0.219	0.227	0.222	0.242	5.6%
	/2:/	0.25	0.242	0.272	0.24	0.243	-3%
8A	/a:/	0.274	0.275	0.267	0.28	0.27	-1.6%
	/e:/	0.189	0.172	0.185	0.184	0.186	-1.9%
	/i:/	0.193	0.221	0.226	0.239	0.204	5.6%
	/o:/	0.298	0.265	0.263	0.279	0.272	-9%
	/u:/	0.241	0.241	0.209	0.207	0.231	-4%
	/y:/	0.239	0.22	0.257	0.194	0.215	-10%
	/2:/	0.239	0.253	0.238	0.225	0.235	-1.9%

Tabelle 3.14: Ergebnisse der relativen Vokaldauern: Mittelwerte der V%-Dauern pro Vokal getrennt nach Aufnahmetermenen. Letzte Spalte: Änderung der Mittelwerte der V%-Dauern von der Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors zu der nach einem Jahr CI-Tragedauer erfolgten Aufnahme in Prozent. Positiver Wert: V%-Dauern sind länger / negativer Wert: V%-Dauern sind kürzer geworden.

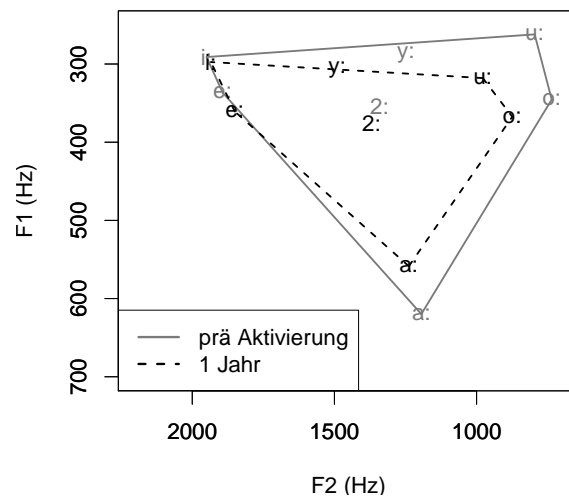
### 3.3.2.4 Vokalräume

Abbildung 3.7 stellt die Vokalräume zu den Aufnahmezeitpunkten vor Aktivierung des Sprachprozessors und nach einem Jahr CI-Tragedauer getrennt nach Sprechern dar. Bei allen drei Sprechern ist zu sehen, dass die Vokalräume nach einem Jahr CI-Tragedauer deutlich kleiner sind als vor der Aktivierung des Sprachprozessors.

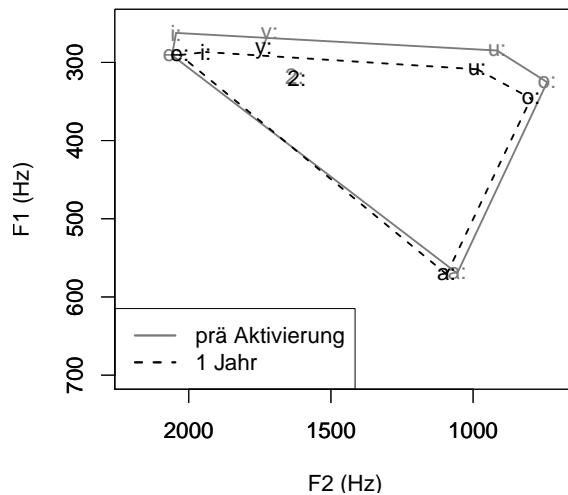
Sprecher-Nr.	prä Aktivierung	1 Monat	3 Monate	6 Monate	1 Jahr	prä Akt. vs. 1 Jahr
<b>7T</b>	235434.4	160739.7	270476.8	218237.9	201208	-14.5%
<b>7X</b>	105761.5	38360.95	73520.75	187727.5	28970.2	-72.6%
<b>8A</b>	124036.3	92778.8	68784.3	118002.3	95904.8	-22.7%

Tabelle 3.15: Ergebnisse der Flächen der Vokalräume getrennt nach Aufnahmetermenen. Letzte Spalte: Änderung der Flächen der Vokalräume von der Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors zu der nach einem Jahr CI-Tragedauer erfolgten Aufnahme in Prozent. Positiver Wert: Fläche des Vokalraumes ist größer geworden / negativer Wert: Fläche des Vokalraumes ist kleiner geworden.

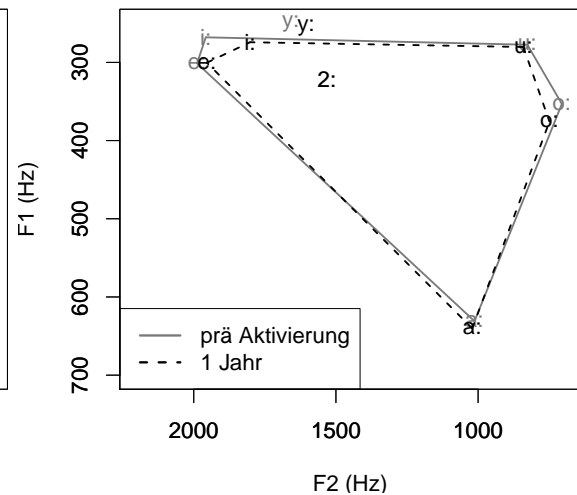
Aus Tabelle 3.15 ist ersichtlich, dass es bei allen drei Sprechern zwischen den einzelnen Aufnahmetermeninen innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung große Unterschiede in der Ausdehnung des Vokalraumes gibt. Diese Größenschwankungen der Vokalräume sind bei allen Sprechern unterschiedlich und es ist kein Trend zu erkennen. Es ist ihnen jedoch allen drei gemeinsam, dass der Vokalraum ein Jahr nach der CI-Versorgung deutlich kleiner ist, als vor Aktivierung des Sprachprozessors. Das ist aus der letzten Spalte in Tabelle 3.15 abzulesen.



(a) Sprecher 7T



(b) Sprecher 7X



(c) Sprecher 8A

Abbildung 3.7: Vergleich der Vokalräume getrennt nach Sprechern.

### 3.3.3 Diskussion

Die Ergebnisse der Langzeitstudie stehen weder mit den Ergebnissen der vorangehenden Studie (Vergleich CI-Träger vs. Kontrollgruppe) noch mit Ergebnissen aus der Literatur im Einklang. F1 ist über den Aufnahmezeitraum bei allen drei Sprechern gestiegen. Im Gegensatz dazu ist F1 sowohl bei einer Studie von Perkell (1992) mit vier amerikanischen CI-Trägern als auch bei Studien von Kishon-Rabin et al. (1999) und Schenk et al. (2003) mit postlingual ertaubten CI-Trägern über den jeweiligen Aufnahmezeitraum gesunken. Im Vergleich zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern in Kapitel 3.2 wurden für alle CI-Gruppen tiefere Werte als für die Kontrollgruppensprecher gefunden. Das widerspricht den Resultaten dieser Langzeitstudie. Die gemessenen, steigenden F1-Werte können auch durch eine größere Mundöffnung beim Sprechen bedingt sein. Diese könnte durch die Wiedererlangung des auditorischen Feedbacks und die damit einhergehende zurückerhaltene Sicherheit beim Sprechen nach einem Jahr CI-Tragedauer begründet sein.

Für F2 wurde in der vorherigen Studie kein Trend für die postlingual ertaubten Sprecher festgestellt. Auch in den Studien von Perkell (1992) und Schenk et al. (2003) gab es für F2 weder einen Trend noch signifikante Unterschiede zwischen den Aufnahmesitzungen. In dieser Langzeitstudie wurde jedoch ein eindeutiger Trend für alle drei Sprecher gefunden: Die F2-Werte steigen, außer für die hohen, vorderen Vokale /e:/ und /i:/ (tiefere Werte).

Bei der Grundfrequenz F0 und den relativen Dauern verhalten sich die drei Sprecher nicht konsistent. Bei beiden Messungen verhalten sich zwei der drei Sprecher so wie die postlingual ertaubten CI-Träger im Vergleich zwischen CI-Gruppen und normal hörenden Sprechern: Die Grundfrequenz ist bei den CI-Trägern tiefer als bei den Kontrollgruppensprechern beziehungsweise F0 sinkt von vor der Aktivierung des Sprachprozessors bis ein Jahr nach der OP. Das stimmt auch mit den Ergebnissen von Kishon-Rabin et al. (1999) und Schenk et al. (2003) überein. Eine mögliche Begründung dafür ist, dass die CI-Träger nach der CI-Versorgung und mit zunehmender Tragedauer den subglottalen Druck besser kontrollieren können.

Die relativen Vokaldauern sind bei den postlingual ertaubten CI-Trägern länger als bei den normal hörenden Sprechern. In der Langzeitstudie sind bei zwei der drei Sprecher die relativen Vokaldauern am Ende des Aufnahmezeitraums länger als zu Beginn. Das ist konsistent mit den Ergebnissen der Langzeitstudie von Vandam et al. (2011), widerspricht aber der Studie von Perkell (1992), in deren Verlauf die Vokaldauern kürzer



geworden sind. Längere Vokaldauern würden die Vermutung, die in Bezug auf die Ergebnisse des ersten Formanten formuliert wurde, dass die CI-Träger den Mund beim Sprechen weiter öffnen, unterstützen, da größere artikulatorische Gesten mehr Zeit erfordern.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Langereis et al. (1997) und Schenk et al. (2003) sind die Vokalräume aller Sprecher im Verlauf der Studie deutlich kleiner geworden. Das widerspricht auch Hypothese 01\_b, in der vermutet wurde, dass die Vokalräume innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung größer werden würden (Ein Überblick über die Hypothesen der Langzeitstudie befindet sich am Ende der Diskussion). Das Ergebnis ist jedoch konsistent mit denen von Horga & Liker (2006), die bei CI-Trägern im Vergleich zu normal hörenden Sprechern kleinere Vokalräume berechneten und den Ergebnissen von Tartter (1989) und Lane (2001), die bei postlingual ertaubten CI-Trägern ein Jahr nach der Versorgung mit einem Cochlear Implantat kleinere Vokalräume maßen als vor der CI-Versorgung. Im vorangehenden Vergleich wurde nur für die Gruppe der prälingual ertaubten und spät versorgten CI-Träger eine starke Zentralisierung festgestellt. Die postlingual ertaubten CI-Träger unterschieden sich in der Größe des Vokalraumes nur marginal von der jeweiligen normal hörenden Kontrollgruppe. Allgemein ist festzuhalten, dass bei postlingual ertaubten Sprechern der Unterschied zwischen dem auditorischen Feedback in der Zeit, in der sie noch gut hören konnten, und dem auditorischen Feedback nach der CI-Versorgung unter Umständen sehr groß ist. Der Vokalraum scheint deshalb erst nach längerer Zeit als dem hier verwendeten Aufnahmezeitraum von einem Jahr wieder eine ähnliche Ausdehnung wie bei den normal hörenden Sprechern zu erlangen, wie sie auch in der vorangehenden Studie gefunden wurde.

Zusammenfassend ist festzuhalten: Die Ergebnisse sind nicht konsistent mit den Ergebnissen des Vergleichs von CI-Trägern mit normal hörenden Sprechern aus Kapitel 3.2. Eine mögliche Erklärung dafür, dass sich die Ergebnisse nicht vereinbaren lassen, ist, dass der Aufnahmezeitraum eine zu kurze Rehabilitationszeit darstellt. Das würde bedeuten, dass sich ein „konstanter Zustand“ erst nach über einem Jahr einstellt, was auch in der Studie von Kishon-Rabin et al. (1999) bestätigt wurde. Leider sind keine weiteren Aufnahmen dieser Sprecher vorhanden. In zukünftigen Studien sollte ein längerer Aufnahmezeitraum eingeplant werden.

Außerdem ist anzumerken, dass die CI-Träger in dieser Studie nicht vor der OP aufgenommen wurden, sondern erst, nachdem das Cochlear Implantat eingesetzt wurde. Durch die OP ist auf der Seite, die mit einem CI versorgt wurde, kein Hörvermögen

mehr vorhanden. Inwiefern sich die Sprache der CI-Träger bereits von der OP bis zum ersten Aufnahmezeitpunkt schon verändert hat, ist leider nicht mehr nachzuvollziehen. Das ist ein methodischer Nachteil, der in weiteren Studien auf jeden Fall vermieden werden sollte.

Hypothese

01_b	Der Vokalraum von CI-Trägern wird innerhalb des ersten Jahres nach einer CI-Versorgung größer.	X
------	--	---

Tabelle 3.16: Übersicht über die Hypothesen der Langzeitanalyse der Vokale.

# Kapitel 4

## Sibilantenanalyse

Die Konsonantenanalyse in diesem Kapitel untersucht die Sibilantenproduktion von CI-Trägern auf zwei verschiedene Herangehensweisen: Wie im vorausgehenden Kapitel 3, das sich mit der Analyse von Vokalen beschäftigt, wird die Sprachproduktion der CI-Träger zuerst mit der von normal hörenden Kontrollgruppensprechern verglichen. Die zweite Studie ist eine Langzeitstudie und untersucht die Veränderung der Sibilantenproduktion von CI-Trägern innerhalb des ersten Jahres nach der Versorgung mit einem Cochlear Implantat.

### 4.1 Motivation und Forschungsfragen

Die Motivation für eine Konsonantenanalyse im Anschluss an die vorangehende Vokalanalyse ist, dass sich der relevante Frequenzbereich der Sibilanten stark von dem der bereits untersuchten Vokale unterscheidet. Die für die Sibilanten charakteristischen Frequenzen sind höher als die der Vokale. Für CI-Träger, deren Frequenzbänder mit den maximal hörbaren Frequenzen typischerweise bei 8000 - 8500Hz liegen, ergibt sich daraus die Problematik, dass ein Teil der für Sibilanten charakteristischen Frequenzen, vor allem von /s/, oberhalb des für sie hörbaren Frequenzbereichs liegen. Eine weitere technische Einschränkung der Cochlear Implantate, die sich insbesondere auf die für die Sibilanten relevanten Frequenzbereiche auswirkt, ist in Abbildung 4.1 dargestellt: Die Filterbänke des Cochlear Implantats werden mit aufsteigender Frequenz immer breiter beziehungsweise sie decken einen immer größeren Frequenzbereich ab. Das wird in der Abbildung anhand von Farben verdeutlicht: Rote Frequenzbänder, die im Tieftonbereich liegen, decken einen Frequenzbereich von jeweils 250Hz ab, gelbe einen Bereich

von 500Hz und grüne Frequenzbänder, die in der schematischen Abbildung im höchsten Frequenzbereich liegen, decken jeweils eine Spanne von 1000Hz ab. Somit ist die Frequenzauflösung im höheren Frequenzbereich wesentlich schlechter als im niedrigeren Frequenzbereich.

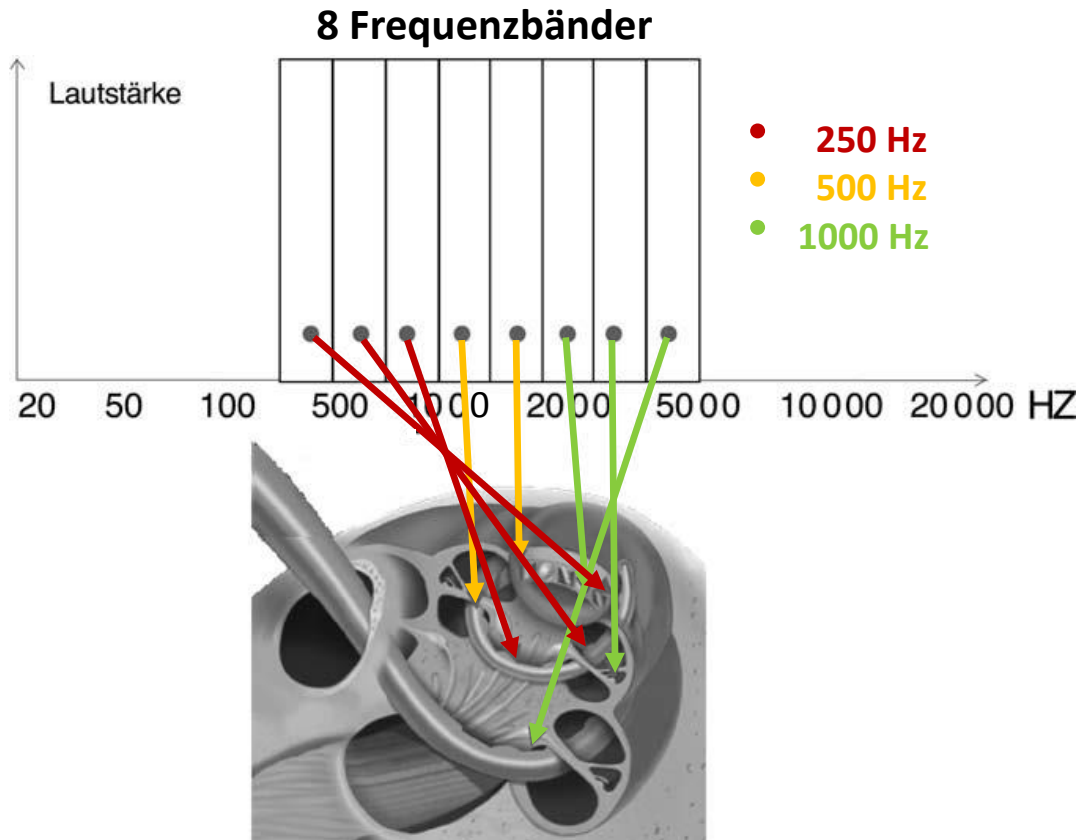


Abbildung 4.1: Schematische Abbildung des Elektrodenträgers eines Cochlear Implantats mit 8 Frequenzbändern in der Cochlear. Die Stimulation des Hörnervs erfolgt frequenzspezifisch in der Schneckenachse zur Nachbildung der Frequenz-Orts-Transformation. Hohe Frequenzen werden an der Schneckenbasis, tiefe an der Schnecken spitze abgebildet. Frequenzbänder umfassen: rot = 250Hz, gelb = 500Hz, grün = 1000Hz. Frequenzbänder werden zur Schneckenbasis (hohe Frequenzen) breiter. (Abbildung aus Wintermantel & Ha (2008) übernommen und ergänzt.)

Dass sich diese technischen Einschränkungen nicht nur auf die Perzeption, sondern auch auf die Produktion der Sibilanten auswirken, lässt sich anhand des bereits in Kapitel 2.1 vorgestellten DIVA-Modells ((Directions into Velocities of Articulators), Abbildung 2.1) von Guenther (Guenther (1995), Guenther et al. (1998), Guenther et al. (2006), Guenther (2006)) erläutern. Laut diesem Modell existiert im linken Operculum frontale

eine „Speech Sound Map“, eine Gehirnregion, in der Repräsentationen aller Phoneme, die der jeweilige Sprecher unterscheidet, gespeichert sind. Voraussetzung dafür ist, dass ein Sprecher diese Repräsentationen durch Hörerfahrung gesammelt und angelegt hat.

Prälingual ertaubte CI-Träger, die die höheren Frequenzanteile der Sibilanten nie gehört haben, haben dementsprechend Repräsentationen von Sibilanten ohne diese höheren Frequenzbereiche in ihrer „Speech Sound Map“. Da Sprecher immer versuchen, das in der „Speech Sound Map“ vorhandene „Soll“ zu produzieren, ist es zwangsläufig so, dass sich der produzierte Laut von einem Sibilanten eines normal hörenden Sprechers unterscheidet. Diese Differenz kann aber auch nicht beim Abgleich von „Soll-“ („Speech Sound Map“) und „Ist-Zustand“ („Auditory State Map“) durch die „Auditory Error Map“ erkannt werden, da ja die Repräsentation in der „Speech Sound Map“ eines CI-Trägers nicht mit der eines normal Hörenden übereinstimmt.

Bei postlingual ertaubten Sprechern liegt die Problematik in einem anderen Bereich des DIVA-Modells. Da diese CI-Träger mit uneingeschränktem auditorischen Feedback sprechen gelernt haben, haben sie in ihrer „Speech Sound Map“ Repräsentationen von Sibilanten mit dem Frequenzanteil im für CI-Träger nicht mehr wahrnehmbaren Bereich. Sie wissen daher wie Sibilanten von normal hörenden Sprechern produziert werden. Sie können die korrekte Produktion dieses höheren Frequenzbereichs in der eigenen Sprache jedoch nach der Ertaubung und der sich daran anschließenden CI-Versorgung nicht mehr anhand eines Abgleichs des „Soll-Zustands“ („Speech Sound Map“) und des „Ist-Zustands“ („Auditory State Map“) überprüfen. Der Grund dafür ist, dass sie zwar durch ein Cochlear Implantat ihr auditorisches Feedback wiedererlangt haben, die höheren Frequenzbereiche jedoch trotzdem nicht mehr wahrnehmen können. Die Konsequenz ist, dass postlingual ertaubte CI-Träger die Repräsentationen von Sprachlauten in der „Speech Sound Map“ in der Zeit kurz nach der CI-Versorgung neu anlegen (Lane et al. (2007)).

Die Sibilantenproduktion von CI-Trägern ist durch diese soeben geschilderten Einschränkungen der CI-Träger ein Untersuchungsgegenstand, der zum einen für die Analyse des Zusammenhangs von Sprachproduktion und -perzeption, aber auch für die Verbesserung der Implantattechnik sehr interessant ist. Im Folgenden sollen mehrere Studien beschrieben werden, die die Sibilantenproduktion von CI-Trägern unter verschiedenen Gesichtspunkten genauer untersucht haben.

Uchanski & Geers (2003) haben in ihrer Studie 181 prälingual ertaubte, englischsprachige CI-Träger zwischen acht und neun Jahren mit 24 normal hörenden Kindern im selben Alter verglichen. Untersucht wurden das 1., 3. und 4. spektrale Moment von /s/ und /S/ beziehungsweise der Abstand der Mittelwerte des 1. spektralen Moments (Schwerpunkt) zwischen /s/ und /S/. Dieser war bei den CI-Trägern viel kleiner als bei den Kontrollgruppensprechern beziehungsweise zum Teil kaum vorhanden. Der kleinere Abstand bei den CI-Trägern kommt vor allem durch die wesentlich tieferen Mittelwerte des ersten spektralen Moments für /s/ zustande. Generell sind die Unterschiede zwischen CI-Trägern und normal hörenden Sprechern bei allen drei untersuchten spektralen Momenten bei /s/ viel größer als bei /S/.

Diese Ergebnisse sind konsistent mit den Resultaten einer Studie von Todd et al. (2011). Sie haben in einer ebenfalls englischsprachigen Studie 39 prälingual ertaubte und bilateral versorgte CI-Kinder zwischen vier und neun Jahren mit 43 normal hörenden Kindern verglichen. Die Studie ist aufgeteilt in einen Vergleich von CI-Trägern und normal hörenden Kindern, die dasselbe Alter haben und CI-Trägern und normal hörenden Kindern, die dasselbe Höralter haben (= Das Alter des normal hörenden Kindes entspricht der CI-Tragedauer des CI-Kindes in Jahren.). In dieser Studie wurden die Frequenz des spektralen Gipfels und das erste spektrale Moment gemessen. Bei beiden Messungen waren die Abstände zwischen den Mittelwerten von /s/ und /S/ bei den CI-Trägern kleiner als bei den normal Hörenden. Wie in der Studie von Uchanski & Geers (2003) unterscheiden sich die CI-Träger von den Kontrollgruppensprechern vor allem in /s/ (CI-Träger haben wesentlich tiefere Werte). Die Unterschiede waren sowohl im Vergleich von CI-Trägern mit gleichaltrigen Kontrollsprechern als auch von CI-Trägern mit normal hörenden Kindern im gleichen Höralter signifikant.

Liker et al. (2007) haben in einer bereits in Kapitel 3.1 erwähnten Studie 18 kroatische, prälingual ertaubte CI-Träger (9.5-15 Jahre) mit 18 in Alter und Geschlecht passenden normal hörenden Sprechern verglichen. Sie haben dazu drei Aufnahmen innerhalb von zwanzig Monaten durchgeführt. Es wurde allerdings nicht die Sprachproduktion vor und nach CI-Versorgung untersucht. Alle CI-Träger waren bereits bei der ersten Aufnahme seit mehreren Jahren mit einem CI versorgt. Die Ergebnisse stimmen mit den bereits beschriebenen Studien von Uchanski & Geers (2003) und Todd et al. (2011) überein: Die Abstände der Mittelwerte von /s/ und /S/ des ersten spektralen Moments sind bei den CI-Trägern signifikant kleiner als bei den normal hörenden Sprechern. Bei allen drei Aufnahmesitzungen überlappt die untere Grenze von /s/ mit der oberen Grenze von /S/. Trotzdem haben sich die CI-Träger von der ersten zur zweiten Messung verbessert, das heißt, der Abstand zwischen /s/ und /S/ wurde größer.

In einer Studie von 2008 betrachteten Mildner und Liker zehn der 18 Kinder aus der soeben beschriebenen Studie von Liker et al. (2007) über einen längeren Zeitraum. Sie werteten vier Aufnahmen über einen Zeitraum von 46 Monaten aus. Gemessen wurde das erste und zweite spektrale Moment (Schwerpunkt und Varianz). Wie in den vorangegangenen Studien sind die Mittelwerte des ersten spektralen Moments von /s/ und /S/ bei den normal hörenden Sprechern klar voneinander getrennt. Bei den CI-Trägern überlappen sie sich bei den ersten drei Messungen. Bei der vierten Messung ist ein positiver Trend zu erkennen: Die Mittelwerte des ersten spektralen Moments von /s/ und /S/ unterscheiden sich signifikant. Bei der ersten und vierten Messung befinden sich die Werte des zweiten spektralen Moments im Wertebereich der normal Hörenden. Bei der zweiten und dritten Messung sind sie wesentlich höher. Insgesamt ist bei dieser Studie, wie es sich auch schon in der Studie von Liker et al. (2007) abgezeichnet hat, eine Verbesserung in der Differenzierung zwischen /s/ und /S/ bei den CI-Kindern erkennbar, auch Jahre nach einer CI-Versorgung.

Die Entwicklung der Sibilantenproduktion von CI-Trägern innerhalb der ersten zwei Jahre nach der CI-Versorgung wurde von Matthies et al. (1994) untersucht. An der Studie haben fünf postlingual ertaubte, englischsprachige CI-Träger teilgenommen. Sie wurden zweimal vor der CI-Versorgung und sechsmal innerhalb der ersten zwei Jahre nach der CI-Versorgung aufgenommen. Gemessen wurde jeweils der Median des ersten und des dritten spektralen Moments. Die Werte des ersten spektralen Moments waren bei zwei der CI-Träger schon vor der CI-Versorgung im Wertebereich eines normal hörenden Sprechers. Diese zwei Sprecher hatten über alle Aufnahmen hinweg annähernd gleich bleibende Werte. Bei zwei Sprechern wurde die Distanz zwischen den Medianen des ersten spektralen Moments von /s/ und /S/ über die zwei Jahre deutlich größer. Der fünfte Sprecher konnte erst nach sechs Monaten Tragedauer zwischen /s/ und /S/ differenzieren. Die Werte des dritten spektralen Moments (Schiefe) sind bei einem Sprecher ebenfalls gleich (gut) geblieben. Bei drei Sprechern ist /S/ gleich geblieben, aber die Werte von /s/ haben sich aus dem Wertebereich eines normal Hörenden entfernt. Der fünfte Sprecher konnte auch bei den Werten des dritten spektralen Moments eine deutliche Steigerung, vor allem in der Differenzierung zwischen /s/ und /S/ aufweisen. Insgesamt verbesserten sich alle Sprecher (außer diejenigen, die vorher schon Werte im Bereich von normal hörenden Sprechern hatten) von der ersten Aufnahme vor der CI-Versorgung bis zwei Jahre danach deutlich und differenzierten am letzten Aufnahmetermin wesentlich eindeutiger zwischen /s/ und /S/ als bei der ersten Aufnahme.

Lane et al. (2007) haben in ihrer Langzeitstudie die Sibilantenproduktion und -perzeption von CI-Trägern innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung genauer betrachtet. Das eigentliche Ziel dieser Studie war es jedoch, hinsichtlich des DIVA-Modells zu untersuchen, ab wann sich nach einer CI-Versorgung wieder eine neue, stabile „Speech Sound Map“ aufgebaut hat. Aus diesem Grund wurden alle Aufnahmen nach der CI-Versorgung sowohl mit eingeschaltetem als auch mit ausgeschaltetem Sprachprozessor durchgeführt und verglichen. Die Versuchspersonen dieser Studie waren acht postlingual ertaubte, unilateral versorgte CI-Träger (ohne weitere Hörhilfe, z.B. Hörgerät). Außerdem nahmen an der Studie zehn normal hörende Kontrollgruppensprecher teil. Die Aufnahmen fanden zweimal vor der CI-Versorgung und einen Monat und ein Jahr danach statt. Gemessen wurde die durchschnittliche Distanz in Hertz zwischen dem ersten spektralen Moment von /s/ und /S/ (aus „sot“ und „shot“). Zusätzlich wurde bei jeder Aufnahmesitzung ein Phonem-Erkennungstest durchgeführt. In diesem Test verbesserten sich die CI-Träger von den zwei Aufnahmen vor der CI-Versorgung zu der Aufnahme einen Monat danach. Von der Aufnahme einen Monat nach der CI-Versorgung bis zu der Aufnahme nach einem Jahr CI-Tragedauer stieg die Phonemerkennungsrate noch einmal. Die Erkennungsraten blieben aber unter denen der normal Hörenden und waren bei den Vokalen besser als bei den Sibilanten. Bei den Sibilanten wurde /S/ bei jeder Sitzung besser erkannt als /s/. Auch in der Produktion verbesserten sich die CI-Träger von vor zu nach der CI-Versorgung und von einem Monat CI-Tragedauer zu einem Jahr CI-Tragedauer. Das heißt, die Distanzen zwischen den Mittelwerten des ersten spektralen Moments von /s/ und /S/ wurden kontinuierlich größer. Eigentlich hatten die Autoren nicht erwartet, dass es einen Monat nach der CI-Versorgung bereits einen Unterschied zwischen den Aufnahmen mit und ohne Sprachprozessor geben würde. Sie sind davon ausgegangen, dass die Gewöhnung an das neue auditorische Feedback noch nicht ausreichend für eine neue, stabile „Speech Sound Map“ ist. Die Distanz zwischen den Mittelwerten des ersten spektralen Moments von /s/ und /S/ bei der Aufnahme mit eingeschaltetem Sprachprozessor war jedoch signifikant größer als mit ausgeschaltetem Sprachprozessor. Bei der Aufnahme nach einem Jahr war der Unterschied, wie von den Autoren prognostiziert, noch größer, da sich die auditorische Feedbackschleife und die „Speech Sound Map“ wieder stabilisiert hatten. Es hatten sich jedoch nur die Werte von /S/ in Richtung der Werte der normal Hörenden verschoben und somit die Distanz zwischen /s/ und /S/ vergrößert. Die Werte von /s/ blieben gleich.

In einer weiteren Studie haben Perkell et al. (2007) anhand von sieben der CI-Träger und sieben der Kontrollgruppensprecher aus der soeben beschriebenen Studie von Lane et al. (2007) den Einfluss von steigendem Signal-Rausch-Verhältnis auf den Sibilan-



tenkontrast untersucht. Die Versuchspersonen wurden ebenfalls vor der CI-Versorgung und nach einem Monat und einem Jahr CI-Tragedauer aufgenommen. Das auditorische Feedback wurde dabei über einen Feedback-Controller manipuliert. Das Rauschen wurde bei jeder Versuchsperson individuell von der unteren Grenze (= kaum wahrnehmbar) bis zur oberen Grenze (= unangenehm) in sieben Stufen eingeteilt. Untersuchungsgegenstand war die durchschnittliche Distanz in Hertz zwischen den Mittelwerten des ersten spektralen Moments von /s/ und /S/. Nach der Hypothese der Autoren werden die Distanzen zwischen den Sibilanten mit steigendem Rauschpegel erst größer, da die Sprecher versuchen deutlicher zu artikulieren. Wenn der Rauschpegel jedoch so hoch wird, dass sie sich selbst nicht mehr hören, werden die Distanzen zwischen /s/ und /S/ wieder kleiner, da Sprecher dann mit geringst möglichem physiologischen Aufwand sprechen. Die Werte der normal hörenden Sprecher waren wie erwartet. Zu erwähnen ist, dass bei einer Verringerung der Distanzen nur die Werte von /S/ höher werden, /s/ aber unverändert bleibt. Die Autoren vermuten, dass die unteren Schneidezähne bei der Produktion als somatosensorischer und damit vom auditorischen Feedback unabhängiger Ankerpunkt genutzt werden. Bei den CI-Trägern konnte bei der Aufnahme nach einem Monat eine Vergrößerung der Distanz zwischen /s/ und /S/ nur nach der Erhöhung zur ersten Stufe des Rauschens gemessen werden. Danach wurde der Abstand zwischen den Mittelwerten des ersten spektralen Moments von /s/ und /S/ immer kleiner. Bei der Aufnahme nach einem Jahr waren die Distanzen zwischen den Sibilanten über die sieben Stufen des Rauschens unverändert. Insgesamt stellten die Autoren fest, dass die Phonemkontraste bei den CI-Trägern bei Rauschen anfälliger sind als bei den normal hörenden Sprechern, bei den Sibilanten mehr als bei den zusätzlich untersuchten Vokalen. Außerdem wurde bei den CI-Trägern mehr Variabilität beobachtet als bei den normal hörenden Kontrollgruppensprechern.

Als Ergänzung zu den hier vorgestellten Studien mit englischen und kroatischen Sprechern soll die Analyse der Sibilantenproduktion im Folgenden auf deutsche CI-Träger erweitert werden. Dafür liegen im Hinblick auf den vorangehenden Literaturüberblick und die bereits durchgeführte Vokalanalyse (Kapitel 3) folgende Hypothesen zugrunde:

#### **Sibilanten:**

- **Hypothese 07:** Die Mittelwerte des stimmlosen alveolaren Frikativs /s/ und des stimmlosen postalveolaren Frikativs /S/ sind beide sowohl bei der Frequenz des DCT-geglätteten spektralen Gipfels als auch beim ersten spektralen Moment bei den CI-Trägern tiefer als bei normal hörenden Kontrollgruppensprechern.

CI-Träger sind in der Perzeption von Sibilanten durch die Technik des Cochlear Implantats eingeschränkt, mehr als zum Beispiel bei Vokalen. Der Grund dafür ist, dass CI-Träger mit dem Implantat in der Regel nur Frequenzen bis 8000Hz (maximal 8500Hz) wahrnehmen können, je nachdem welches das höchste aktivierte Frequenzband ist. Da Sibilanten Phoneme mit Frequenzanteilen im hochfrequenten Bereich (bis ca. 10000Hz) sind, sind sie besonders betroffen. Ein Teil der Frequenzen, der vor allem auch zur Unterscheidung von /s/ und /S/ wichtig ist, ist somit für CI-Träger nicht hörbar. Darauf stützt sich auch die siebte Hypothese, dass die Mittelwerte von /s/ und /S/ beide sowohl bei der Frequenz des DCT-geglätteten spektralen Gipfels als auch beim ersten spektralen Moment bei den CI-Trägern tiefer sind als bei normal hörenden Kontrollgruppensprechern. Dahinter steht die Annahme, dass die CI-Träger die Phoneme in einen Frequenzbereich verschieben, der für sie besser wahrnehmbar ist. Dafür müssen vor allem die Frequenzen von /s/ tiefer sein, aber um den Kontrast aufrecht erhalten zu können, werden auch die Frequenzen von /S/ gesenkt.

- **Hypothese 08:** Die Spektren des stimmlosen alveolaren Sibilanten /s/ und des stimmlosen postalveolaren Sibilanten /S/ unterscheiden sich bei den CI-Trägern nicht so stark wie bei den Kontrollgruppensprechern. Vor allem die Distanz zwischen den Mittelwerten von /s/ und /S/ ist sowohl bei der Frequenz des DCT-geglätteten spektralen Gipfels als auch beim ersten spektralen Moment bei den CI-Trägern kleiner als bei normal hörenden Kontrollgruppensprechern.
- **Hypothese 08\_b:** Die Distanz zwischen den Mittelwerten von /s/ und /S/ wird sowohl bei der Frequenz des DCT-geglätteten spektralen Gipfels als auch beim ersten spektralen Moment von vor der CI-Versorgung bis ein Jahr danach immer größer.

In der achten Hypothese wird jedoch angenommen, dass die Distanz zwischen den Mittelwerten von /s/ und /S/ sowohl bei der Frequenz des DCT-geglätteten spektralen Gipfels als auch beim ersten spektralen Moment bei den CI-Trägern trotzdem kleiner ist als bei normal hörenden Sprechern. Diese Annahme liegt vor allem darin begründet, dass die Frequenzbänder der Cochlear Implantate in höheren Frequenzbereichen breiter sind als im Tieftonbereich. Daraus folgt, dass die spektrale Auflösung wesentlich schlechter ist als bei normal hörenden Sprechern und CI-Träger deshalb nicht so gut zwischen /s/ und /S/ differenzieren können. Aus der Problematik, dass CI-Träger viele Unterschiede zwischen /s/ und /S/ nicht wahrnehmen können, folgt zwangsläufig, dass sie die zwei Sibilanten auch nicht so unterschiedlich produzieren wie normal hörende Sprecher.

Hypothese 08\_b bezieht sich auf die Langzeitstudie. Es wird davon ausgegangen, dass sowohl bei der Frequenz des spektralen Gipfels als auch beim ersten spektralen Moment die Distanz zwischen den zwei analysierten Sibilanten /s/ und /S/ größer wird. Diese Annahme liegt darin begründet, dass die CI-Träger mit dem auditorischen Feedback des Cochlear Implantats die Sibilanten besser unterscheiden können als vor der CI-Versorgung. Je besser sie die Sibilanten akustisch differenzieren können, umso unterschiedlicher produzieren sie sie auch.

- **Hypothese 09:** Der stimmlose alveolare Frikativ /s/ weicht bei allen untersuchten Parametern mehr von den Werten der normal hörenden Sprecher ab als der stimmlose postalveolare Frikativ /S/.

Laut Hypothese 09 sind jedoch nicht alle Sibilanten gleichermaßen betroffen. Die Begründung geht aus den soeben geschilderten technischen Einschränkungen des Cochlear Implantats hervor: Ein Teil der für /s/ wesentlichen Frequenzen liegt außerhalb des für CI-Träger hörbaren Bereichs. Der Frequenzbereich von /S/ liegt wesentlich tiefer und ist somit davon nicht (in dem Ausmaß) betroffen. Außerdem erfordert die Produktion von /s/ eine wesentlich präzisere Artikulation als die Produktion von /S/.

#### CI-Gruppen:

- **Hypothese 10:** Die Gruppen mit den prälingual ertaubten CI-Trägern weisen im Vergleich zu den normal hörenden Sprechern größere Unterschiede auf als die postlingual ertaubten CI-Träger.

Wie in der vorangehenden Vokalanalyse (Kapitel 3.2) wird auch bei den Sibilanten erwartet, dass sich die Ergebnisse für die einzelnen Gruppenvergleiche unterscheiden. In Hypothese 10 wird angenommen, dass die Gruppen mit den prälingual ertaubten CI-Trägern im Vergleich zu den normal hörenden Sprechern größere Unterschiede aufweisen als die postlingual ertaubten CI-Träger. Der Grund dafür ist, dass postlingual ertaubte CI-Träger mit uneingeschränktem auditorischen Feedback Sprechen gelernt haben. Dabei nahmen sie die Sibilanten und auch den ganzen Frequenzbereich, den die Sibilanten abdecken, mit einer wesentlich besseren spektralen Auflösung wahr. Das ist einem prälingual ertaubten CI-Träger, der von Anfang an auf das auditorische Feedback des Implantats angewiesen ist, nicht möglich.

- **Hypothese 11:** Die Gruppe der prälingual ertaubten CI-Träger, die spät versorgt wurden, weist im Vergleich zu ihrer normal hörenden Kontrollgruppe die größten Unterschiede auf.

Vor allem ist es für die prälingual ertaubten und spät versorgten CI-Träger schwierig, da sie in der Zeit, in der eigentlich der Spracherwerb stattfindet, kein oder nur sehr stark eingeschränktes Feedback ihrer eigenen Sprache wahrgenommen haben. Die CI-Träger aus dieser Gruppe wurden zum Teil erst Jahre danach mit einem CI versorgt. Im Gegensatz dazu verfügten die früh versorgten, prälingual ertaubten CI-Träger und die postlingual ertaubten CI-Träger während der Spracherwerbsphase über auditorisches Feedback. Daraus resultiert die elfte Hypothese, dass die Gruppe der prälingual ertaubten CI-Träger, die spät versorgt wurden, im Vergleich zu ihrer normal hörenden Kontrollgruppe die größten Unterschiede aufweist.

- **Hypothese 12:** Von den zwei Gruppen mit postlingual ertaubten CI-Trägern weist im Vergleich zur jeweiligen normal hörenden Kontrollgruppe die Gruppe mit den nach kurzer Zeit versorgten CI-Trägern die größeren Unterschiede auf.

Hypothese 12 stützt sich vor allem auf die Ergebnisse der vorangegangenen Vokalanalyse (Kapitel 3.2). Die Ergebnisse dieser Studie deuteten darauf hin, dass postlingual ertaubte CI-Träger, die sehr schnell mit einem Implantat versorgt werden, Probleme damit haben, dass sich das neue auditorische Feedback durch das Implantat sehr von dem auditorischen Feedback vor der Ertaubung unterscheidet. Das Resultat ist, dass die CI-Träger versuchen, sich selbst wieder so wahrzunehmen wie vor der CI-Versorgung und dadurch stark überkompensieren. Vergeht zwischen der Ertaubung und der CI-Versorgung eine längere Zeitspanne, tritt dieses Phänomen nicht auf, zumindest nicht in gleichem Maße.

## 4.2 Vergleich CI-Träger und normal hörende Sprecher

Dieses Kapitel beinhaltet die erste der zwei Studien zur Produktion von Sibilanten: den Vergleich von CI-Trägern und normal hörenden Kontrollgruppensprechern. Dabei werden im ersten Abschnitt, der Methode (Kapitel 4.2.1), die Grundlagen dieser Studie erläutert. Zuerst werden die teilnehmenden Sprecher beschrieben (Kapitel 4.2.1.1), wel-

ches Sprachmaterial der Studie zugrunde liegt (Kapitel 4.2.1.2) und wie die erhobenen Daten weiterverarbeitet und ausgewertet wurden (Kapitel 4.2.1.3). Anschließend folgt ein Abschnitt über die Ergebnisse der Studie (Kapitel 4.2.2), der in mehrere Unterkapitel aufgeteilt ist, und eine Diskussion der Resultate (Kapitel 4.2.3) im Hinblick auf vorhandene Literatur und die der Studie zugrundeliegenden Hypothesen.

## 4.2.1 Methode

### 4.2.1.1 Sprecher

Die Teilnehmer an dieser Studie sind dieselben wie die der vorangehenden Vokalanalyse (Kapitel 3.2). Bei der Segmentierung der Aufnahmen ist jedoch aufgefallen, dass ein Sprecher aus Kontrollgruppe 4 stark lispelt. Er wurde deshalb gegen einen Sprecher, der als Kontrollgruppensprecher im Rahmen der Kooperation mit dem Klinikum Großhadern (Erklärung siehe Kapitel 2.2) aufgenommen wurde, ausgetauscht. Der neue Kontrollgruppensprecher ist ebenfalls männlich und im selben Alter wie der ursprüngliche Sprecher. Er wurde in einem schallarmen Raum am Klinikum Großhadern aufgenommen und hat dasselbe Sprachmaterial gelesen wie die Kontrollgruppensprecher, die am IPS aufgenommen wurden. Da er zusätzliches Material lesen musste, wiederholte er jeden Satz nur fünfmal. Bei den CI-Trägern wurden bei der Segmentierung über die Hälfte der teilnehmenden Sprecher als mehr oder weniger lispelnd eingestuft. Deshalb wurde davon ausgegangen, dass das keine Ausnahme ist, und kein Sprecher aus der Studie ausgeschlossen.

Insgesamt nahmen an dieser Studie 48 CI-Träger und 48 Kontrollgruppensprecher teil. Die CI-Träger wurden wie in Kapitel 2.1 beschrieben in 4 Gruppen eingeteilt. Einzelheiten zur Alters- und Geschlechtsverteilung der einzelnen Gruppen sind Kapitel 3.2.1.1 zu entnehmen. Die Metadaten zu den einzelnen Sprechern sind in Tabellen im Anhang (B) aufgelistet.

### 4.2.1.2 Sprachmaterial

Im Rahmen dieser Studie wurde der stimmlose, alveolare Frikativ /s/ und der stimmlose, postalveolare Frikativ /S/ untersucht. Beide Sibilanten stehen ambisyllabisch in der zweiten Silbe von zweisilbigen Zielwörtern. Die Satzbetonung liegt auf dem jeweiligen Zielwort, die Wortbetonung liegt immer auf der ersten Silbe des Zielwortes. Die Zielwörter unterscheiden sich nur durch die untersuchten Sibilanten und sind in den Trägersatz „Hier steht ... geschrieben.“ eingebettet (siehe Tabelle 4.1).

Sibilant	Satz
/s/	Hier steht 'Tasse' geschrieben.
/S/	Hier steht 'Tasche' geschrieben.

Tabelle 4.1: Trägersätze und Zielwörter der Sibilantenanalyse.

Die Sätze wurden zusammen mit dem in Kapitel 2.2 beschriebenen Sprachmaterial in randomisierter Reihenfolge gelesen. Jeder Satz wurde sechsmal wiederholt. Insgesamt gibt es von jedem Probanden also 12 Aufnahmen von Sibilanten ( $= 6 * /s/$  und  $6 * /S/$ ).

#### 4.2.1.3 Datenbearbeitung und -auswertung

Die der Sibilantenanalyse zugrundeliegenden Spektren wurden in EMU anhand von „tkassp“ berechnet. Die Aufnahmen wurden mit einer Sample-Rate von 44,1kHz durchgeführt. Die Spektren wurden mit einem Blackman-Fenster, einer Fensterverschiebung von 5ms und einer Fensterbreite von 1024 berechnet. Das Spektrum eines jeden Phonems wurde mithilfe des Mittelwerts aus 25 bis 75% des Zeitverlaufs bestimmt. Der Frequenzbereich der Spektren reicht von 0 bis 22.05kHz. Für die Auswertung wurde der Frequenzbereich jedoch aus folgenden Gründen oben und unten abgeschnitten: Um Filtereffekte des Tiefpasses auszuschließen, wurde die Obergrenze des ausgewerteten Spektrums auf 20kHz gesetzt. Aufgrund von Artefakten, die durch die Aufnahme bedingt sind, treten im Frequenzbereich unterhalb von 1000Hz häufig spektrale Gipfel auf. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 4.2 auf der linken Seite dargestellt.

Diese Gipfel sind höher als die, die bei der Untersuchung der Frequenz des spektralen Gipfels analysiert werden sollen und würden somit die Auswertung verfälschen. Das geht aus den unterschiedlichen Positionen des roten Punktes in Abbildung 4.2 hervor. Aus diesem Grund werden die Werte unterhalb von 1000Hz für die weitere Auswertung weggelassen. Ein Beispiel für ein daraus resultierendes Spektrum, das in der Sibilantenanalyse verwendet wird, ist in Abbildung 4.2 auf der rechten Seite abgebildet. Für alle folgenden Analysen (außer für die Differenz der Steigung) wurde der Frequenzbereich von 1-20kHz verwendet.

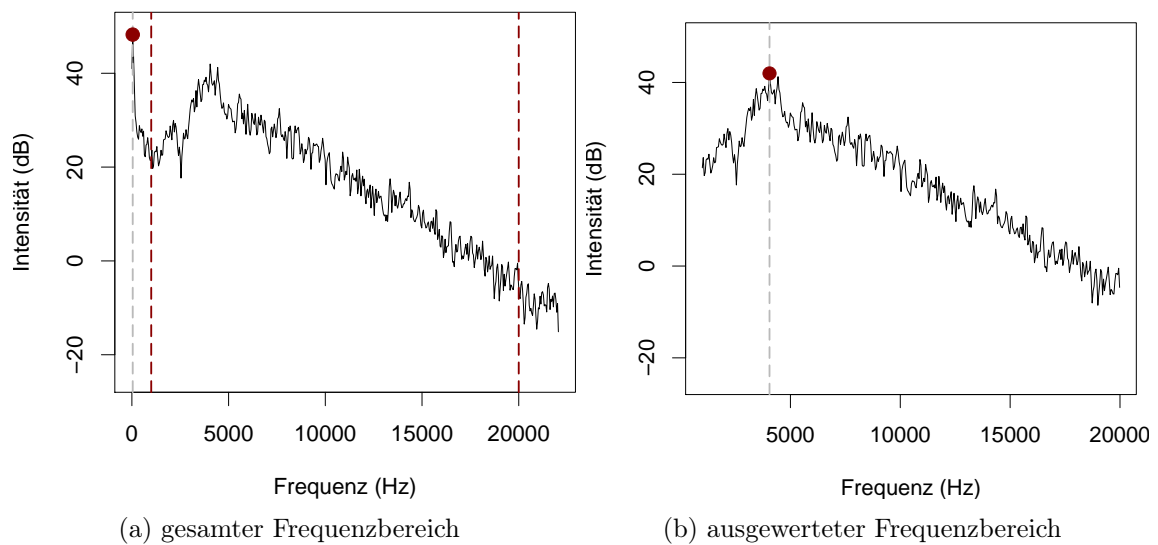


Abbildung 4.2: Spektrale Gipfel (roter Punkt) in zwei verschiedenen Frequenzbereichen: links (a): 0 - 22050Hz / rechts (b): 1000 - 20000Hz. In Abbildung (a) liegt der Gipfel bei einem durch die Aufnahme bedingten Artefakt (43Hz). Die Grenzen, an denen das Spektrum oben und unten abgeschnitten wird, sind rot gestrichelt eingetragen. In Abbildung (b) ist der Gipfel bei der maximalen Amplitude (4048Hz). (Versuchsperson Nr. = 58, Phonem = /S/, Wiederholung = 01)

Der erste analysierte Parameter ist die **Frequenz des spektralen Gipfels**. Bei einem DFT-Spektrum (DFT = Diskrete Fourier-Transformation) liegt der Gipfel des Spektrums jedoch oft nicht in der Mitte des Energiekonzentrationsbereichs, sondern, wie in Abbildung 4.3 links, auf einer der vielen Spitzen innerhalb dieses Bereichs.

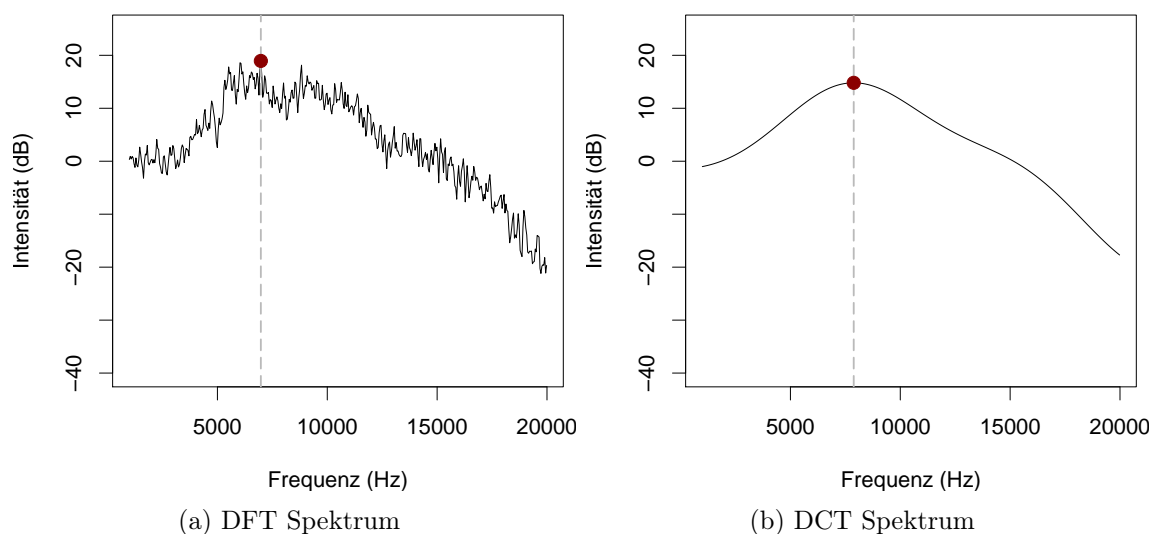


Abbildung 4.3: Spektrale Gipfel (roter Punkt) im DFT-Spektrum (a): 6977Hz und im DCT-Spektrum (b): 7881Hz. (Versuchsperson Nr. = 91, Phonem = /s/, Wiederholung = 01)

Um dadurch verursachte Abweichungen zu vermeiden, wurden die DFT-Spektren in DCT-Spektren (= eine Cosinus-Reihenentwicklung des DFT-Spektrums und anschließende Rücktransformation mit nur den ersten 6 DCT-Koeffizienten (= Glättung 6. Ordnung)) umgewandelt. Bei den geglätteten Kurven liegt der Gipfel des Spektrums, wie in Abbildung 4.3 rechts, am höchsten Punkt des Energiekonzentrationsbereichs.

Bei einigen Sprechern trat bei der Glättung jedoch ein Problem auf, das in Abbildung 4.4 dargestellt ist:

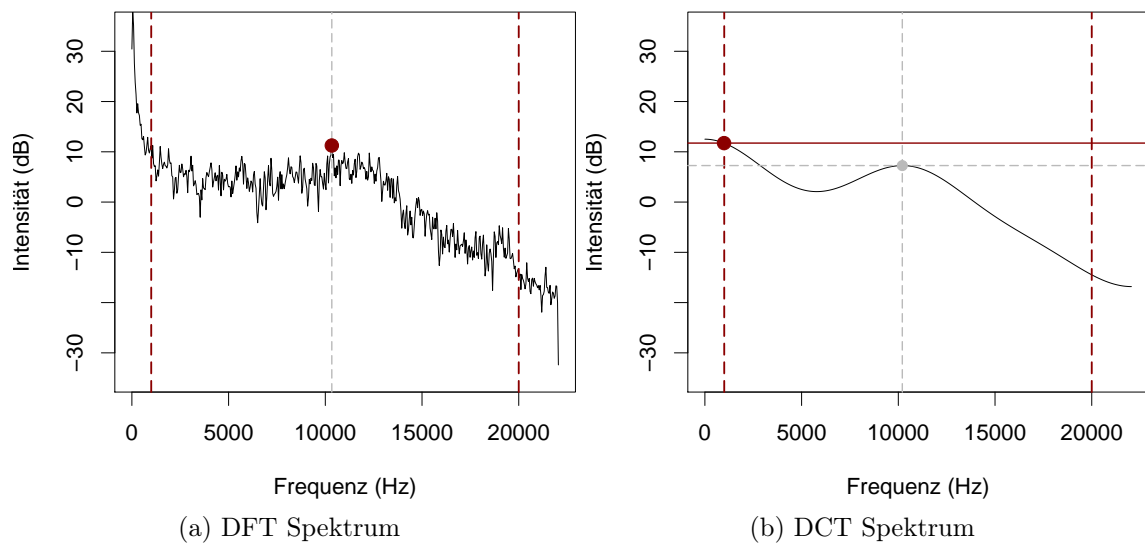


Abbildung 4.4: Problemfall bei den DCT-geglätteten Spektren: Abbildung (a): DFT-Spektrum, die rot gestrichelten Linien stehen für die Grenzen des ausgewerteten Bereichs, der rote Punkt markiert den spektralen Gipfel / Abbildung (b): DCT Spektrum, die rot gestrichelten Linien stehen für die Grenzen des ausgewerteten Bereichs, der rote Punkt markiert den aufgrund des Artefakts gemessenen spektralen Gipfel, der graue Punkt markiert den eigentlichen spektralen Gipfel. (Versuchsperson Nr. = 27, Phonem = /S/, Wiederholung = 05)

Die Kurve der DCT-Glättung beinhaltet auch das Artefakt unter 1000Hz, das im DFT-Spektrum in der Abbildung 4.4 (a) links von der 1000Hz-Linie zu sehen ist. In Abbildung (b) ist zu sehen, wo die DCT-Kurve die 1000Hz-Linie schneidet. Bei manchen Äußerungen ist dieser Schnittpunkt wie im Fall der Abbildung 4.4 höher als der DCT-Spektralgipfel. Alle diese Problemfälle haben als Frequenzwert den ersten spektralen Frequenzwert über 1000Hz (= 1033.594Hz). Bei allen Äußerungen, bei denen das der Fall war (insgesamt 31), wurden die Werte ausgeschlossen.



Die Messung der **Differenz der spektralen Steigung** basiert auf einer Methode von Evers et al. (1998) und Jesus & Shadle (2002) zur Differenzierung zwischen stimmlosen alveolaren und stimmlosen postalveolaren Frikativen. Bei dieser Berechnung wird nur der Bereich zwischen 1000 und 8000Hz analysiert, da laut Evers et al. (1998) überhalb von 8000Hz keine unterscheidenden Merkmale im Signal vorhanden sind. Für die Berechnung der Differenz der spektralen Steigung wird der Bereich zwischen 1000 und 8000Hz in zwei Teile geteilt. Die Grenze ist der Mittelwert aller spektralen Gipfel der DFT-Spektren von /s/ von allen CI- und Kontrollgruppensprechern (= 3618.856Hz). Wie auch aus Abbildung 4.5 ersichtlich ist, geht der erste Teil (a) somit von 1000 bis 3618Hz und der zweite Teil (b) von 3619 bis 8000Hz.

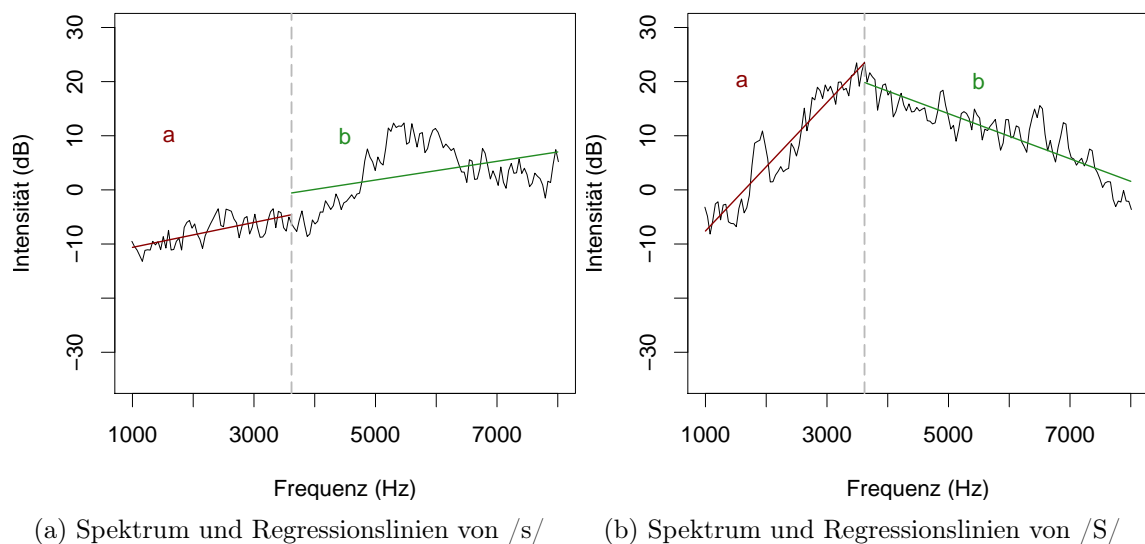


Abbildung 4.5: Veranschaulichung der Differenz der spektralen Steigung: Abbildung (a): Spektrum und Regressionslinie von /s/. Steigungen im Bereich a und b sind positiv. Abbildung (b): Spektrum und Regressionslinie von /S/. Steigung im Bereich a ist positiv, im Bereich b negativ. Die Grenze (gestrichelte Linie) liegt bei 3618.856Hz. (Versuchsperson Nr. = 70, Phonem = /s/: Wiederholung = 02 / Phonem = /S/: Wiederholung = 05)

Die Differenz der spektralen Steigung wird folgendermaßen berechnet: Sie entspricht der Differenz aus der spektralen Steigung a und der spektralen Steigung b.

Bei einem stimmlosen alveolaren Frikativ (/s/) wird erwartet, dass die Steigung in beiden Bereichen positiv ist. Somit ist die Steigungsdifferenz relativ gering oder negativ. Für einen stimmlosen postalveolaren Frikativ (/S/) ist zu erwarten, dass die Steigung im Bereich (a) positiv und im Bereich (b) negativ ist. Für die Steigungsdifferenz von /S/ sind dementsprechend höhere positive Werte zu erwarten als für /s/.

Eine weitere Möglichkeit, spektrale Unterschiede zu betrachten, ist, das Spektrum auf eine kleine Anzahl von Parametern zu reduzieren, die die grundlegenden Eigenschaften des Signals beschreiben. Das wird anhand einer Berechnung von **spektralen Momenten** ermöglicht (Harrington (2010)). Dieses Vorgehen beruht auf der Methode von Forrest et al. (1988). Die vier spektralen Momente bestehen aus:

$$\text{dem Schwerpunkt } m_1 = \frac{\sum A x}{\sum A}$$

$$\text{der Varianz } m_2 = \frac{\sum A(x-M_1)^2}{\sum A}$$

$$\text{der Schiefe } m_3 = \left( \frac{\sum A(x-M_1)^3}{\sum A} \right) M_2^{-1.5}$$

$$\text{und der Wölbung } m_4 = \left[ \left( \frac{\sum A(x-M_1)^4}{\sum A} \right) M_2^{-2} \right] - 3$$

(A = Amplitude / x = Frequenz / M = Moment)

Für diese Studie wurden zuerst die Amplitudenwerte delogarithmiert, da die logarithmierten dB-Werte für die Summierung in den Gleichungen nicht geeignet sind (deshalb wurde nicht wie in Harrington (2010) der minimale dB-Wert auf 0 gesetzt). Anschließend wurden die vier spektralen Momente mit der Funktion „moments“ in R berechnet (Näheres zu dieser Funktion und deren Anwendung siehe Harrington (2010)).

## Statistik

Die Statistik wurde wie schon in Kapitel 3.2.1.3 beschrieben durchgeführt. Es wurde anhand von R (Team R Core (2014)) und lme4 (Bates et al. (2012)) eine „linear mixed effects analysis“ berechnet. Es wurden für jeden Sibilanten und jeden Gruppenvergleich einzelne Modelle berechnet (zum Beispiel: Unterschied in der Frequenz des spektralen Gipfels zwischen Gruppe „CI 3“ und Kontrollgruppe 3 für den Frikativ /s/.) Die abhängige Variable ist der jeweils untersuchte Parameter. Gruppe, Geschlecht und Alter sind between Faktoren. Random Faktoren sind die Wiederholung und die Nummer der Versuchsperson.

### 4.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der in dieser Konsonantenanalyse ausgewerteten Parameter sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Um die Ergebnisse für /s/ und /ʃ/ gut vergleichen zu können, stehen sie bei jedem Parameter direkt untereinander (/s/ oben, /ʃ/ unten). In jedem Feld stehen in der Mitte die berechneten p-Werte, die im Falle eines signifikanten Unterschieds zwischen CI-Trägern und der jeweiligen Kontrollgruppe fett hervorgehoben sind. Unter den p-Werten stehen die Differenzen der Mittelwerte (eines Parameters) zwischen einer CI-Gruppe und der jeweiligen Kontrollgruppe in Prozent. Höhere Werte der CI-Gruppe im Vergleich zu ihrer zugehörigen Kontrollgruppe bedeuten positive Werte. Umgekehrt steht ein negativer Wert für niedrigere Werte der CI-Träger im Vergleich zu den normal hörenden Sprechern.

Parameter	Phonem	CI vs. KG Gruppe 1	CI vs. KG Gruppe 2	CI vs. KG Gruppe 3	CI vs. KG Gruppe 4
<b>DCT- Spektralgipfel</b>	/s/	* <b>0.0104</b> −8.9%	*** <b>0.0009</b> −22.9%	0.129 −8.5%	. <b>0.088</b> −17.8%
	/ʃ/	0.552 5.7%	0.493 −4.8%	* <b>0.031</b> −11.2%	*** <b>0.0004</b> −10.9%
<b>Differenz der spektralen  Steigung</b>	/s/	— −3.7%	* <b>0.011</b> −87.2%	0.338 −33.4%	0.176 −145.6%
	/ʃ/	. <b>0.068</b> −14.9%	*** <b>6.22e-05</b> −35.2%	. <b>0.061</b> −21.2%	0.347 −8.6%
1. spektrales Moment	/s/	** <b>0.004</b> −5.2%	*** <b>1.787e-06</b> −9.8%	** <b>0.001</b> −8.6%	** <b>0.003</b> −6.9%
	M1 Schwerpunkt	0.583 −2.2%	0.186 −3.6%	* <b>0.04</b> −6.7%	** <b>0.002</b> −7.4%

2. spektrales Moment	/s/	— 1.4%	*** <b>0.0005</b> 14.9%	** <b>0.005</b> 14.4%	** <b>0.001</b> 12.5%
M2 Varianz	/ʃ/	0.4 −2.9%	— −0.4%	0.167 −6.3%	0.616 −1.4%
3. spektrales Moment	/s/	** <b>0.008</b> 107.6%	*** <b>0.0001</b> 190.4%	0.156 68.5%	0.157 43.4%
M3 Schiefe	/ʃ/	0.447 9.9%	0.493 6.6%	0.101 18.2%	* <b>0.047</b> 15.8%
4. spektrales Moment	/s/	— 2.7%	0.178 −22.6%	* <b>0.022</b> −48.5%	. <b>0.072</b> −24.3%
M4 Wölbung	/ʃ/	0.175 48.7%	0.299 97.8%	* <b>0.03</b> 174.5%	. <b>0.078</b> 171.9%

Tabelle 4.2: Ergebnisse der spektralen Gipfel im DCT-Spektrum, der Differenz der spektralen Steigung und der vier spektralen Momente jeweils getrennt nach /s/ (oben) und /S/ (unten): Obere Zeile: Signifikanzen (gegebenenfalls mit einem „.“ bzw. einem bis drei „\*“ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile: Differenz der Mittelwerte des jeweiligen Parameters zwischen CI- und KG-Gruppe in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte / negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte).

#### 4.2.2.1 Frequenz des spektralen Gipfels im DCT-Spektrum

Aus Abbildung 4.6 und den Differenzen der Mittelwerte zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern in Tabelle 4.2 ist ersichtlich, dass die Mittelwerte der CI-Träger mit Ausnahme von /S/ von Gruppe 1 durchgehend tiefer sind als die der normal hörenden Kontrollgruppensprecher. Die DCT-Spektralgipfel für /s/ unterscheiden sich signifikant in den Gruppen 1, 2 und 4 (schwach bei Gruppe 4). Bei /S/ wurden für die Gruppen 3 und 4 signifikante Unterschiede in der Frequenz des Gipfels im DCT-Spektrum gemessen.

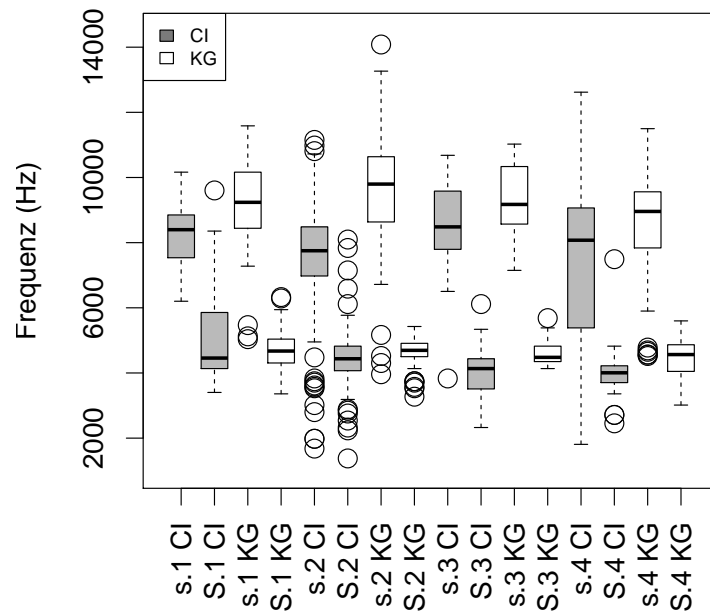


Abbildung 4.6: Spektrale Gipfel im DCT-geglätteten Spektrum: paarweise Anordnung der Ergebnisse für /s/ (links) und /S/ (rechts) pro Gruppe.

#### 4.2.2.2 Differenz der spektralen Steigung

Die Mittelwerte der Differenz der spektralen Steigung sind für /s/ bei den CI-Trägern durchgehend höher (negative Werte) und für /S/ tiefer als die der Kontrollgruppensprecher. Das ist sowohl Tabelle 4.2 als auch Abbildung 4.7 zu entnehmen.

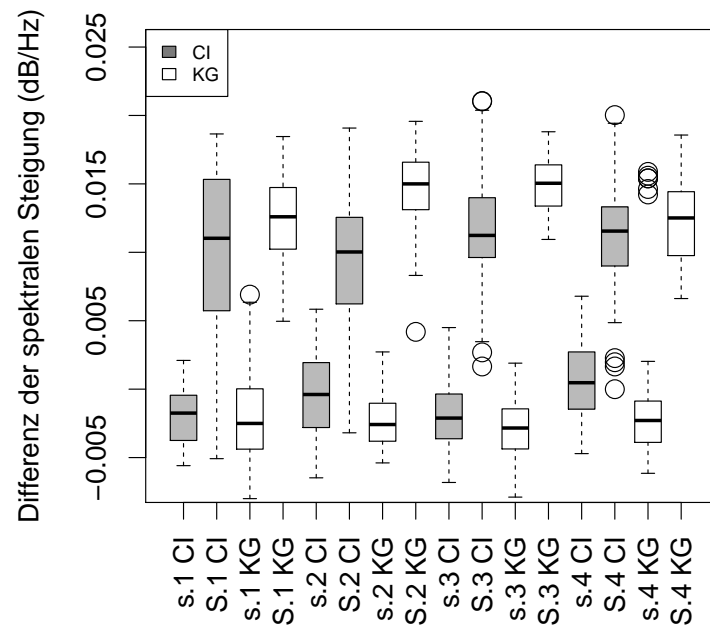


Abbildung 4.7: Differenz der spektralen Steigung: paarweise Anordnung der Ergebnisse für /s/ (links) und /S/ (rechts) pro Gruppe.

Für /s/ ist der Unterschied in der Differenz der spektralen Steigung zwischen CI-Gruppe und ihrer zugehörigen Kontrollgruppe mit normal hörenden Sprechern nur für Gruppe 2 signifikant. Bei /S/ unterscheiden sich Gruppe 2 signifikant und Gruppe 1 und 3 schwach signifikant von ihren jeweiligen Kontrollgruppen.

#### 4.2.2.3 Spektrale Momente

Die Ergebnisse für die vier ausgewerteten spektralen Momente sind zusätzlich zu Tabelle 4.2 in Abbildung 4.8 visualisiert.

##### 1. spektrales Moment - Schwerpunkt

Die Ergebnisse für das erste spektrale Moment sind aus dem Boxplot links oben in Abbildung 4.8 ersichtlich. Die CI-Träger aller vier Gruppen unterscheiden sich bei /s/ im Schwerpunkt signifikant von den normal hörenden Kontrollgruppensprechern. Für /S/ sind die Unterschiede zwischen CI-Gruppe 3 und 4 und ihren jeweiligen Kontrollgruppen signifikant. Die Mittelwerte sind für beide Sibilanten bei allen vier CI-Gruppen durchgehend tiefer als bei den zugehörigen Kontrollgruppen.

##### 2. spektrales Moment - Varianz

Die Ergebnisse des zweiten spektralen Moments sind in der Grafik 4.8 rechts oben abgebildet. Die Mittelwerte des 2. spektralen Moments, der Varianz, sind bei allen vier CI-Gruppen für /s/ durchgehend höher als die der zugehörigen Kontrollgruppen. Die Unterschiede zwischen CI- und Kontrollgruppen sind signifikant bei Gruppe 2, 3 und 4. Für /S/ verhält es sich genau umgekehrt: Die Mittelwerte der CI-Träger sind tiefer als die der Kontrollgruppensprecher. In der Varianz von /S/ gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den CI-Trägern und den normal hörenden Sprechern.

##### 3. spektrales Moment - Schiefe

Wie aus dem Boxplot links unten in Abbildung 4.8 gut zu erkennen ist, sind alle Mittelwerte des 3. spektralen Moments der CI-Träger höher als die der Kontrollgruppensprecher. Die Unterschiede zwischen den CI-Gruppen und ihren zugehörigen Kontrollgruppen in der Schiefe sind bei Gruppe 1 und 2 für /s/ und bei Gruppe 4 für /S/ signifikant.

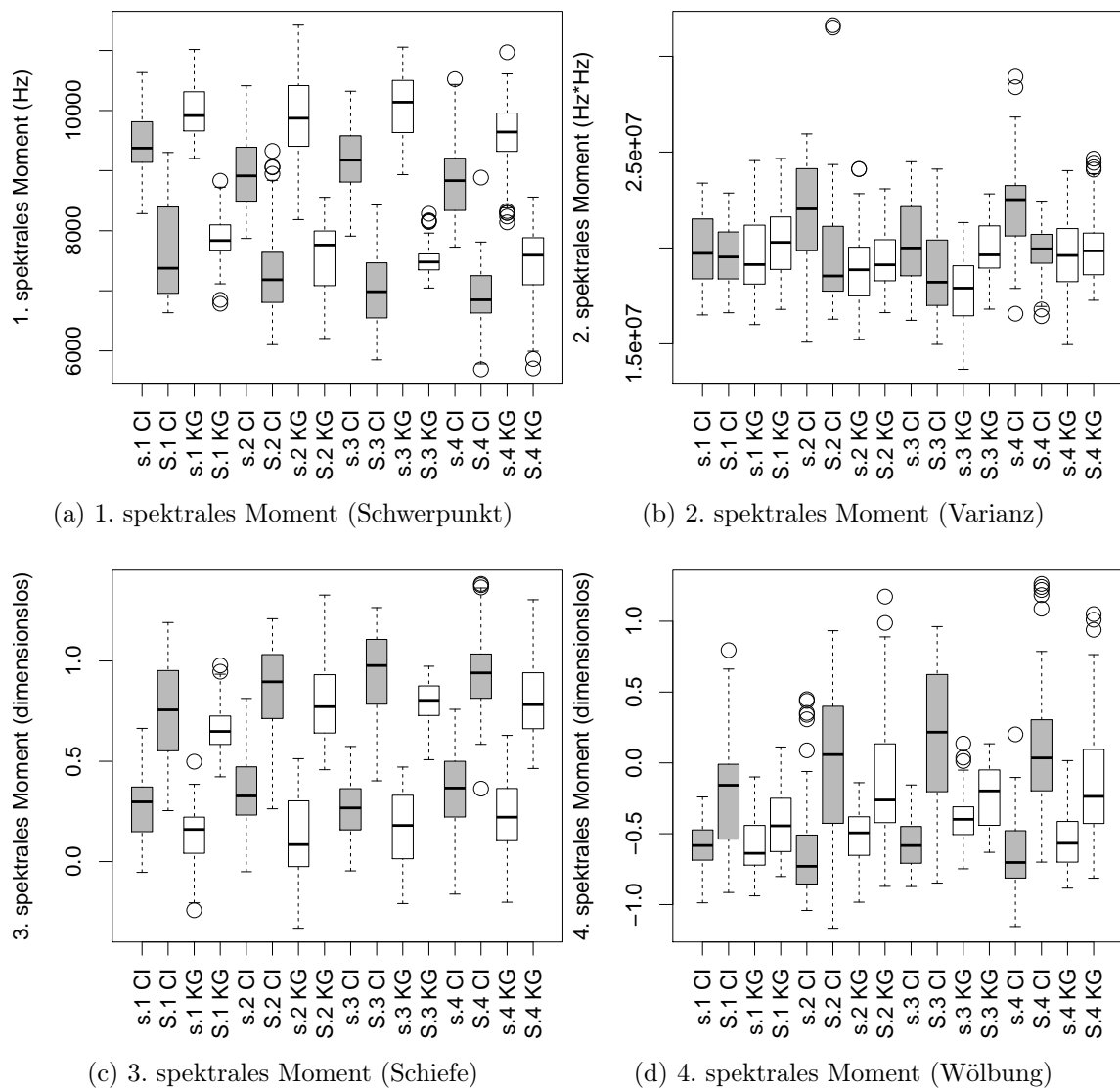


Abbildung 4.8: Spektrale Momente (1-4): paarweise Anordnung der Ergebnisse für /s/ (links) und /S/ (rechts) pro Gruppe. grau = CI-Träger / weiß = Kontrollgruppe.

#### 4. spektrales Moment - Wölbung

Aus dem Boxplot rechts unten in Abbildung 4.8 ist ersichtlich, dass die Mittelwerte der CI-Träger für die Wölbung von /s/ mit Ausnahme von Gruppe 1 tiefer sind als die der Kontrollgruppensprecher. Signifikant ist der Unterschied für Gruppe 3 und schwach signifikant für Gruppe 4. Die Mittelwerte der CI-Träger für /S/ sind im Gegensatz dazu durchgehend höher als die ihrer Kontrollsprecher. Die Gruppen 3 und 4 (schwach bei Gruppe 4) unterscheiden sich signifikant von den jeweiligen Kontrollgruppen.

### 4.2.3 Diskussion

Die Ergebnisse der Sibilantenanalyse werden in diesem Kapitel im Hinblick auf die vorhandene Literatur diskutiert. Das letzte Unterkapitel 4.2.3.5 beinhaltet sowohl einen Überblick über alle Hypothesen als auch darüber, ob beziehungsweise für welche Gruppen sie angenommen wurden.

#### 4.2.3.1 Frequenz des spektralen Gipfels im DCT-Spektrum

Die Untersuchung der Frequenz der spektralen Gipfel im DCT-Spektrum von /s/ und /S/ ergab bei den CI-Trägern (mit Ausnahme von /S/ bei Gruppe 1) durchgehend tiefere Werte als bei den Kontrollgruppensprechern. Dieses Ergebnis entspricht der siebten Hypothese, laut der die Mittelwerte von /s/ und /S/ beide sowohl bei der Frequenz des DCT-geglätteten spektralen Gipfels als auch beim ersten spektralen Moment bei den CI-Trägern tiefer sind als bei normal hörenden Kontrollgruppensprechern. Das ist durch technische Einschränkungen des Cochlear Implantats zu begründen: Frequenzen überhalb von 8000-8500Hz sind für CI-Träger nicht hörbar. Die für /s/ relevanten Frequenzen liegen jedoch zum Teil bei bis zu 10000Hz. Zusätzlich sinkt die spektrale Auflösung des Cochlear Implantats, je höher der Frequenzbereich ist, da die einzelnen Frequenzbänder immer größere Frequenzbereiche abdecken. Die CI-Träger senken also die für die Sibilanten relevanten Frequenzen, um sie in einen Bereich zu verschieben, der für sie im Fall von /s/ noch wahrnehmbar und generell (/s/ und /S/) besser aufgelöst ist.

Die prälingual ertaubten Sprecher unterscheiden sich in /s/ signifikant von ihren jeweiligen Kontrollgruppen. Sie konnten in ihrer Spracherwerbsphase die Frequenzen überhalb von 8000Hz nicht wahrnehmen. Somit kann nach dem DIVA-Modell von Guenther (z.B. Guenther (2006), siehe Kapitel 2.1) angenommen werden, dass sie in ihrer „Speech Sound Map“ dementsprechende Repräsentationen von /s/ gespeichert haben. Daraus folgt, dass die Produktion der eigenen alveolaren Sibilanten auch nicht als falsch wahrgenommen wird und sich zwangsläufig von der normal hörender Sprecher unterscheidet.

Die postlingual ertaubten Sprecher, die während ihres Spracherwerbs normal hörten, passen ihre Repräsentationen der Sibilanten nach der CI-Versorgung zwar an (Lane et al. (2007)), können sich jedoch auch nach der Ertaubung auf sensomotorische Ankerpunkte stützen, die vor der Ertaubung erlernt wurden, wie zum Beispiel die Schneidezähne für /s/. Dass diese Vorgehensweise hilfreich für einen möglichst großen Kontrast zwischen /s/ und /S/ ist, wurde von Perkell et al. (2004b) mit normal hörenden Spre-



chern nachgewiesen: Es wurde für diejenigen Probanden der stärkste akustische Kontrast gefunden, die sowohl eine hohe Diskriminationsfähigkeit zwischen /s/ und /S/ als auch einen ausgeprägten Kontakt zwischen der Zunge und den unteren Schneidezähnen aufwiesen. Das heißt, sie nutzten ein klar definiertes somatosensorisches Ziel für /s/. Das wird auch in einer Untersuchung von Matthies et al. (1996) deutlich, die mittels elektromagnetischer Artikulographie beobachteten, dass sich die Zunge des untersuchten CI-Trägers bei /S/ nach dem Ausschalten des Implantats nach vorne verlagerte, während /s/ stabil blieb. In der vorliegenden Studie unterscheiden sich die postlingual ertaubten CI-Träger in /S/ signifikant von den normal hörenden Kontrollgruppensprechern. Das ist, abgesehen vom Fehlen eines somatosensorischen Ziels, vor allem durch die Verlagerung der Frequenzen in einen für sie selbst besser wahrnehmbaren Bereich zu begründen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung bestätigen außerdem auch die achte Hypothese, die besagt, dass die Spektren der stimmlosen alveolaren Sibilanten und der stimmlosen postalveolaren Sibilanten sich bei den CI-Trägern nicht so stark unterscheiden wie bei den Kontrollgruppensprechern. Das liegt zum einen daran, dass die CI-Träger einen kleineren Frequenzbereich für die Unterscheidung der Sibilanten zur Verfügung haben (bis 8000-8500Hz). Zum anderen können sie die Sibilanten wegen der schlechteren spektralen Auflösung weniger gut unterscheiden als normal Hörende. Dementsprechend produzieren CI-Träger /s/ und /S/ auch nicht so differenziert.

#### 4.2.3.2 Differenz der spektralen Steigung

Auch die Ergebnisse der Differenz der spektralen Steigung liegen bei den CI-Trägern für /s/ und /S/ näher zusammen als bei den normal hörenden Sprechern. Das heißt, dass sich die Spektren bei den CI-Trägern nicht nur in der Lage des Gipfels (siehe Kapitel 4.2.3.1) weniger stark unterscheiden als bei den Kontrollgruppensprechern, sondern auch in der Form des Spektrums. Das trifft vor allem auf die Gruppe der prälingual ertaubten Sprecher, die spät versorgt wurden, zu. Auch wenn diese Ergebnisse die achte Hypothese, dass sich /s/ und /S/ bei den CI-Trägern weniger unterscheiden als bei den Kontrollgruppensprechern, unterstützen, sind sie kritisch zu betrachten: Die Werte für /S/ würden vermuten lassen, dass die Spektren der CI-Träger flacher sind als die der normal hörenden Sprecher. Das könnte sowohl durch eine weniger ausgeprägte Rillenbildung auf der Zunge bei der Produktion von /S/ als auch durch einen weniger zielgerichteten Luftstrom begründet sein. Im Hinblick auf die Ergebnisse bezüglich des zweiten und dritten spektralen Moments (siehe Kapitel 4.2.2.3 und die anschließende

Diskussion), die auf einen sehr ausgeprägten Gipfel der CI-Träger bei /S/ hindeuten, liegt eher der Verdacht nahe, dass diese Ergebnisse durch das methodische Vorgehen dieser Untersuchung begründet sind. Wenn die Gipfel der CI-Träger von /S/ bei einer niedrigeren Frequenz als dem errechneten Mittelwert aller Sprecher von 3618.856Hz liegen (was großteils der Fall ist), fällt das Spektrum bereits wieder bis zu diesem Mittelwert. Somit sinkt Steigung a, von der Steigung b subtrahiert wird. Daraus folgen niedrigere Werte der Differenz der spektralen Steigung für /S/ für die CI-Träger.

#### 4.2.3.3 Spektrale Momente

Die Ergebnisse der Untersuchung des **ersten spektralen Moments** beziehungsweise des Schwerpunkts sind konsistent mit den Ergebnissen der Studien von Uchanski & Geers (2003), Liker et al. (2007), Mildner & Liker (2008), Todd et al. (2010) und Todd et al. (2011). Die Werte von /s/ sind bei allen vier CI-Gruppen signifikant tiefer als bei den jeweiligen Kontrollgruppen. Die Werte von /S/ sind ebenfalls bei allen vier CI-Gruppen tiefer als bei den normal Hörenden, jedoch nur bei den zwei Gruppen mit postlingual ertaubten Sprechern signifikant. Diese Resultate bestätigen wie bereits bei den Frequenzen des spektralen Gipfels im DCT-Spektrum zum einen die siebte Hypothese, dass die Mittelwerte von /s/ und /S/ beide sowohl bei der Frequenz des DCT-geglätteten spektralen Gipfels als auch beim ersten spektralen Moment bei den CI-Trägern tiefer sind als bei normal hörenden Kontrollgruppensprechern. Auf der anderen Seite wird aber auch die achte Hypothese, nach der die Spektren der stimmlosen alveolaren Sibilanten und der stimmlosen postalveolaren Sibilanten sich bei den CI-Trägern nicht so stark unterscheiden wie bei den Kontrollgruppensprechern, verifiziert. Zusätzlich trifft auch die neunte Hypothese, die besagt, dass /s/ mehr von den Werten der normal hörenden Sprecher abweicht als /S/, zu. Auch diese Resultate sind wie bereits in der Diskussion der Frequenz des spektralen Gipfels (siehe Kapitel 4.2.3.1) sowohl durch den eingeschränkten wahrnehmbaren Frequenzbereich der CI-Träger, durch den relevante Frequenzanteile von /s/ für die CI-Träger nicht wahrnehmbar sind, als auch durch die schlechtere Frequenzauflösung in höheren Frequenzbereichen, die für die Perzeption von /s/ und /S/ essentiell sind, zu begründen.

Dem **zweiten spektralen Moment** beziehungsweise der Varianz wird von Forrest et al. (1988) kein Beitrag zur Differenzierung von Frikativen zugeschrieben. Das scheint sich in dieser Studie zu bestätigen: Die Ergebnisse für die normal Hörenden in dieser Studie entsprechen nicht den Erwartungen aus Forrest et al. (1988), Jongman et al. (2000) und Maniwa et al. (2009), nach denen der Wert des alveolaren Sibilanten /s/

höher sein sollte als der des postalveolaren /S/. Bei den CI-Trägern ist das jedoch der Fall. Das heißt, dass die Energie im Spektrum von /s/ bei den CI-Trägern homogener verteilt ist als bei den normal hörenden Sprechern. Bei /S/ ist die Energie im Gegensatz dazu bei den CI-Trägern konzentrierter als bei den Kontrollgruppensprechern.

Die Werte des **dritten spektralen Moments** beziehungsweise der Schiefe sind umso höher, je weiter sich der dominierende Teil der Verteilung eines Spektrums im tiefen Frequenzbereich befindet (und in den höheren Frequenzbereich flach ausläuft). Die Werte der CI-Träger sind sowohl bei /s/ als auch bei /S/ deutlich höher als die der Kontrollgruppensprecher. Das ist konsistent mit der bereits bei der Frequenz des spektralen Gipfels und dem ersten spektralen Moment beobachteten Verlagerung in einen tieferen Frequenzbereich. Dieses Ergebnis bestätigt wiederum die Annahme, dass die relevanten spektralen Eigenschaften der Sibilanten in Frequenzbereiche verschoben werden, die eine bessere spektrale Auflösung haben.

Die Ergebnisse des **vierten spektralen Moments** beziehungsweise der Wölbung komplettieren die vorangehenden Resultate. Die /s/-Spektren der CI-Träger sind, wie auch bei der Differenz der spektralen Steigung zu sehen ist, flacher als die der normal hörenden Sprecher. Das resultiert in diesem Fall wahrscheinlich aus einem weniger zielgerichteten Luftstrom der CI-Träger bei der Produktion von /s/. Bei /S/ haben die CI-Träger jedoch einen wesentlich ausgeprägteren Gipfel als die Kontrollgruppensprecher. Die Ursache dafür liegt darin, dass die CI-Träger versuchen, die für /S/ relevanten Charakteristika in einem wesentlich kleineren spektralen Bereich anzusiedeln, da das /s/ in einem tieferen Frequenzbereich liegt als bei den normal hörenden Sprechern. Aufgrund dessen ist der Gipfel von /S/ stärker gestaucht als bei normal hörenden Sprechern. Dieser gestauchte Gipfel in den /S/-Spektren der CI-Träger ist wesentlich ausgeprägter als die Gipfel der Kontrollgruppensprecher, was zur Folge hat, dass die Werte des vierten spektralen Moments bei den CI-Trägern wesentlich höher sind.

#### 4.2.3.4 Zusammenfassung

Insgesamt ist festzuhalten, dass sich die Spektren für /s/ und /S/ bei den CI-Trägern in einen niedrigeren Frequenzbereich verlagern und die Differenz der Mittelwerte für /s/ und /S/ bei der Frequenz des spektralen Gipfels im DCT-Spektrum und dem ersten spektralen Moment bei den CI-Trägern kleiner ist als bei den normal hörenden Sprechern. Außerdem unterscheiden sich die CI-Gruppen bei /s/ wesentlich häufiger signifikant von ihren jeweiligen Kontrollgruppen als bei /S/. Das heißt, dass die drei Hypothesen, die die spektralen Eigenschaften der Sibilanten betreffen, bestätigt wurden.

Das trifft jedoch nicht auf die Hypothesen zu, die die Gruppen betreffen. Nach der zehnten Hypothese weisen die prälingual ertaubten CI-Träger im Vergleich zu den normal hörenden Sprechern größere Unterschiede auf als die postlingual ertaubten CI-Träger. Es ist jedoch genau das Gegenteil der Fall. Bei den Sibilanten scheint es so zu sein, dass die prälingual ertaubten CI-Träger, die während ihrer Spracherwerbsphase weder Sibilanten mit einer besseren spektralen Auflösung, noch einen größeren Frequenzbereich wahrgenommen haben, besser mit den technischen Einschränkungen eines Cochlear Implantats zurecht kommen als postlingual ertaubte Sprecher. Bei den postlingual ertaubten CI-Trägern ist der Unterschied zwischen den vor der Ertaubung in der „Speech Sound Map“ gespeicherten Repräsentationen und dem auditorischen Feedback nach der CI-Versorgung anscheinend so groß, dass sie trotz einer sehr schnellen Anpassung der „Speech Sound Map“ (siehe Lane et al. (2007)) dauerhaft Probleme mit der Produktion von Sibilanten haben. In der zwölften Hypothese wird angenommen, dass von den zwei Gruppen mit postlingual ertaubten CI-Trägern im Vergleich zur jeweiligen normal hörenden Kontrollgruppe die Gruppe mit den nach kurzer Zeit versorgten CI-Trägern die größeren Unterschiede aufweist. Dabei wurde davon ausgegangen, dass bei einer CI-Versorgung kurz nach der Ertaubung die Repräsentationen in der „Speech Sound Map“ noch klarer vorhanden sind als nach einer längeren Ertaubung und somit die Probleme der CI-Träger nach der CI-Versorgung größer sind. Da sich aber beide Gruppen gleich verhalten, scheint die Dauer zwischen Ertaubung und der Versorgung in diesem Fall keine Rolle zu spielen. Die zwei Gruppen der postlingual ertaubten Sprecher unterscheiden sich am deutlichsten von ihren jeweiligen Kontrollgruppen. Das steht im Gegensatz zu der Annahme in der elften Hypothese, nach der die Gruppe der prälingual ertaubten CI-Träger, die spät versorgt wurden, im Vergleich zu ihrer normal hörenden Kontrollgruppe die größten Unterschiede aufweist. Alle drei Hypothesen über die Gruppenunterschiede konnten somit nicht bestätigt werden.

#### 4.2.3.5 Überblick Hypothesen

	Gruppe			
	1	2	3	4
07 Die Mittelwerte des stimmlosen alveolaren Frikativs /s/ und des stimmlosen postalveolaren Frikativs /S/ sind beide sowohl bei der Frequenz des DCT-geglätteten spektralen Gipfels als auch beim ersten spektralen Moment bei den CI-Trägern tiefer als bei normal hörenden Kontrollgruppensprechern.	✓	✓	✓	✓

<b>08</b>	Die Spektren der stimmlosen alveolaren Sibilanten und der stimmlosen postalveolaren Sibilanten unterscheiden sich bei den CI-Trägern nicht so stark wie bei den Kontrollgruppensprechern. Vor allem die Distanz zwischen den Mittelwerten von /s/ und /S/ ist sowohl bei der Frequenz des DCT-geglätteten spektralen Gipfels als auch beim ersten spektralen Moment bei den CI-Trägern kleiner als bei normal hörenden Kontrollgruppensprechern.	✓	✓	✓	✓
<b>09</b>	Der stimmlose alveolare Frikativ /s/ weicht bei allen untersuchten Parametern mehr von den Werten der normal hörenden Sprecher ab als der stimmlose postalveolare Frikativ /S/.	✓	✓	✓	✓
<b>10</b>	Die Gruppen mit den prälingual ertaubten CI-Trägern weisen im Vergleich zu den normal hörenden Sprechern größere Unterschiede auf als die postlingual ertaubten CI-Träger.	✗	✗	✗	✗
<b>11</b>	Die Gruppe der prälingual ertaubten CI-Träger, die spät versorgt wurden, weist im Vergleich zu ihrer normal hörenden Kontrollgruppe die größten Unterschiede auf.	–	✗	–	–
<b>12</b>	Von den zwei Gruppen mit postlingual ertaubten CI-Trägern weist im Vergleich zur jeweiligen normal hörenden Kontrollgruppe die Gruppe mit den nach kurzer Zeit versorgten CI-Trägern die größeren Unterschiede auf.	–	–	✗	–

Tabelle 4.3: Übersicht über die Hypothesen der Sibilantenanalyse.

## 4.3 Langzeitstudie

Im vorangehenden Kapitel 4.2 wurde die Produktion von Sibilanten von CI-Trägern, die bereits seit mindestens einem Jahr mit einem Cochlear Implantat versorgt sind, mit der Sibilantenproduktion von in Alter und Geschlecht passenden Kontrollgruppensprechern verglichen. Darauf aufbauend wird in diesem Kapitel die Entwicklung der Sibilantenproduktion von vor der Versorgung mit einem Cochlear Implantat bis ein Jahr danach untersucht. Es ist davon auszugehen, dass sich die Sibilantenproduktion bei postlingual ertaubten Sprechern in der Zeit von der Ertaubung bis zur CI-Versorgung verändert hat, da kein auditorisches Feedback zur Kontrolle der eigenen Sprachproduktion zur Verfügung stand. Das Interessante an dieser Untersuchung ist, wie die postlingual ertaubten Sprecher zum Zeitpunkt der CI-Versorgung Sibilanten produzieren und wie schnell nach der Wiedererlangung von auditorischem Feedback eine Veränderung einsetzt. Eine weitere Motivation ist, zu beobachten wie die Sprecher mit dem durch die CI-Technik eingeschränkten auditorischen Feedback zurecht kommen.

Der Aufbau dieses Kapitels ist dabei folgendermaßen: Zuerst wird das methodische Vorgehen dieser Studie beschrieben (Kapitel 4.3.1), daran schließt sich ein Überblick über die Ergebnisse an (Kapitel 4.3.2), die schließlich im letzten Abschnitt dieses Kapitels diskutiert werden (Kapitel 4.3.3).

### 4.3.1 Methode

#### 4.3.1.1 Sprecher

An dieser Langzeitanalyse der Sibilantenproduktion von CI-Trägern haben drei männliche, postlingual ertaubte Sprecher teilgenommen. Es sind dieselben, die auch in der Langzeitstudie über Vokalproduktion (siehe Kapitel 3.3) analysiert wurden. Die drei Sprecher und die Einschlusskriterien für die Studien werden in Kapitel 3.3.1.1 genauer beschrieben. Ein Überblick über die Metadaten der Sprecher liefert Tabelle 3.11 in Kapitel 3.3.1.1.

#### 4.3.1.2 Sprachmaterial

Um die Entwicklung der Sibilantenproduktion innerhalb des ersten Jahres nach der Versorgung mit den Werten von CI-Trägern, die seit mindestens einem Jahr ein CI haben, vergleichen zu können, ist das Sprachmaterial dieser Langzeitstudie dasselbe wie in der vorangehenden Sibilantenanalyse (Kapitel 4.2). Untersucht wurden der stimmlose alveolare Sibilant /s/ und der stimmlose postalveolare Sibilant /ʃ/ in den Wörtern

„Tasse“ und „Tasche“. Das Sprachmaterial wird in Kapitel 4.2.1.2 genauer beschrieben. Der einzige Unterschied ist, dass die Sätze bei der Langzeitstudie aufgrund des größeren Korpusumfangs, den die Langzeitstudiensprecher lesen mussten, jeweils nur fünfmal wiederholt wurden.

#### 4.3.1.3 Datenerhebung

Die Aufnahmen wurden zu folgenden Zeitpunkten der CI-Versorgung durchgeführt:

- **prä Aktivierung:** 1-3 Tage nach OP beziehungsweise am Tag der Sprachprozessoraktivierung
- **1 Monat:** 1 Monat nach Aktivierung des Sprachprozessors
- **3 Monate:** 3 Monate nach Aktivierung des Sprachprozessors
- **6 Monate:** 6 Monate nach Aktivierung des Sprachprozessors
- **1 Jahr:** bei der ersten Jahreskontrolle

#### 4.3.1.4 Datenbearbeitung und -auswertung

Sowohl die Bearbeitung der Daten als auch die Auswertung der einzelnen untersuchten Parameter entsprechen dem Vorgehen in der vorangehenden Studie über Sibilantenproduktion. Beides ist in Kapitel 4.2.1.3 beschrieben.

Wie auch in der vorangehenden Langzeitstudie über Vokalproduktion gibt es keine Kontrollgruppensprecher. Es werden nur einzelne Aufnahmesitzungen eines jeweiligen Sprechers verglichen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen zu wenige Datenpunkte für eine statistische Bewertung der Unterschiede vor. Die Ergebnisse dieser Studie werden aus diesem Grund im folgenden Kapitel deskriptiv ausgewertet.

### 4.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Langzeitanalyse der Sibilantenproduktion sind für alle Parameter in Tabelle 4.4 getrennt nach den drei Sprechern zusammengefasst. Es sind jeweils die Mittelwerte der Wiederholungen pro Aufnahmezeitpunkt eingetragen. Die Ergebnisse für die zwei Sibilanten /s/ und /S/ stehen immer direkt übereinander. In der letzten Spalte ist die Änderung der Mittelwerte von „prä Aktivierung“ bis „1 Jahr nach OP“ in Prozent angegeben. Bei einem positiven Wert sind die Werte eines jeweiligen Parameters nach einem Jahr CI-Tragedauer im Vergleich zu vor der Aktivierung des Sprachprozessors gestiegen, bei einem negativen Wert gesunken.

Sprecher	Sibilant	prä Aktivierung	1 Monat nach OP	3 Monate nach OP	6 Monate nach OP	1 Jahr nach OP	Vergleich prä Aktivierung vs. 1 Jahr
<b>Frequenz des spektralen Gipfels im DCT-Spektrum</b>							
7T	/s/	8871.7	7476.3	9445.9	8268.8	7028.4	-20.8%
	/S/	3522.8	4341.1	3548.7	3970.7	4005.2	13.7%
7X	/s/	5133.5	4427.2	4513.4	4401.4	5452.2	6.2%
	/S/	4160.2	3789.8	3807.1	3789.8	4280.8	2.9%
8A	/s/	6752.8	9224.8	9922.5	6218.8	9293.7	37.6%
	/S/	3376.4	3410.9	3643.4	3755.4	3686.5	9.2%
<b>Differenz der spektralen Steigung</b>							
7T	/s/	-0.002	-0.002	-0.0006	-0.001	-0.003	84.9%
	/S/	0.019	0.02	0.022	0.02	0.021	5.7%
7X	/s/	0.004	0.004	0.005	0.003	0.004	-10.5%
	/S/	0.019	0.016	0.019	0.018	0.016	-16.1%
8A	/s/	-0.0008	-0.001	-0.0001	0.0009	-0.001	81%
	/S/	0.022	0.024	0.023	0.023	0.025	13.3%
<b>Spektrale Momente</b>							
<b>1. spektrales Moment: Schwerpunkt</b>							
7T	/s/	8627.9	8569.7	8913.3	8955	8465.7	-1.9%
	/S/	6698.6	6997.7	6775.2	6694.2	6823.6	1.9%
7X	/s/	7733.1	7764.2	7585.2	8243.1	7632.1	-1.3%
	/S/	6524.8	6534.6	6315.2	6980.3	6674.3	2.3%
8A	/s/	8526.5	8787.4	8866.9	8451.3	8970.3	5.2%
	/S/	5734.5	6115.1	6229.2	6056.4	6167.8	7.6%

Tabelle 4.4: Ergebnisse für die Frequenz des spektralen Gipfels im DCT-Spektrum, die Differenz der spektralen Steigung und des ersten spektralen Moments (Schwerpunkt): Mittelwerte getrennt nach Sibilant und Aufnahmetermen. Letzten Spalte: Änderung der Mittelwerte von der Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors zu der nach einem Jahr CI-Tragedauer erfolgten Aufnahme in Prozent (positiver Wert: Werte sind gestiegen / negativer Wert: Werte sind gesunken).

#### 4.3.2.1 Frequenz des spektralen Gipfels im DCT-Spektrum

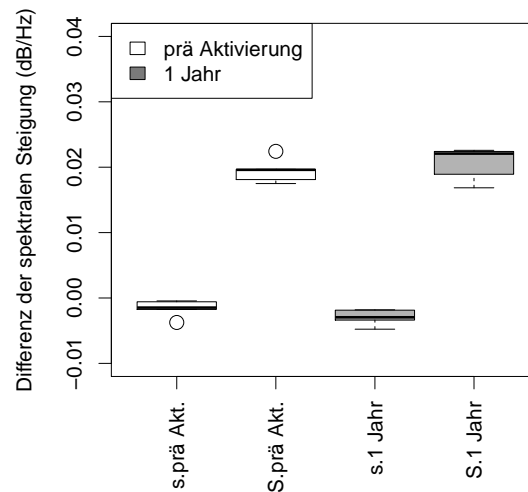
Die Frequenzen des spektralen Gipfels und der Abstand zwischen den Frequenzen des spektralen Gipfels für /s/ und /S/ schwanken bei allen drei Sprechern zwischen der ersten Aufnahme vor der CI-Versorgung und der Aufnahme nach einem Jahr CI-Tragedauer, vor allem bei Sprecher 7T und 8A. Generell sind die Schwankungen bei /s/ stärker als bei /S/. Bei Sprecher 7T sinkt die Frequenz des spektralen Gipfels für /s/ stark und steigt für /S/. Die Distanz zwischen den Gipfeln der zwei Sibilanten ist somit bei der Aufnahme nach einem Jahr deutlich kleiner als vor der CI-Versorgung.



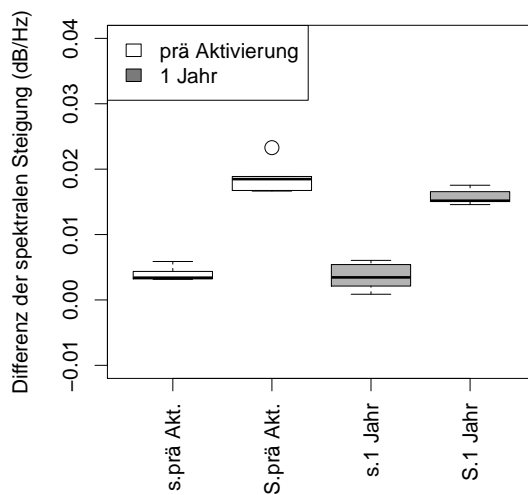
Bei den anderen zwei Sprechern steigen jeweils sowohl der Gipfel für /s/ als auch für /S/. Da die Frequenz des spektralen Gipfels für /s/ in beiden Fällen mehr ansteigt, ist bei beiden Sprechern die Distanz zwischen den Gipfeln ein Jahr nach der CI-Versorgung größer als vor der Implantation.

#### 4.3.2.2 Differenz der spektralen Steigung

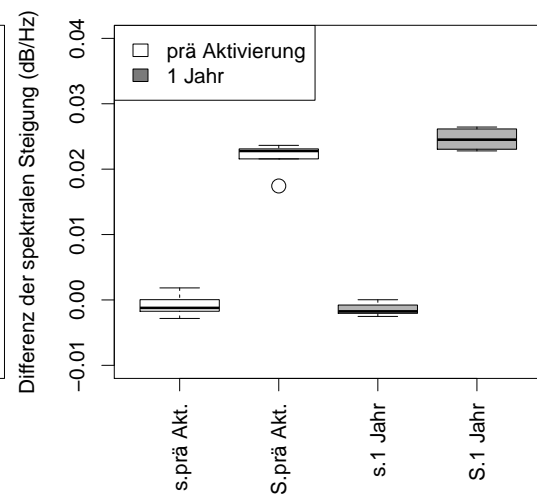
Da sich die Werte der Differenz der spektralen Steigung für /s/ sowohl im knapp negativen als auch im positiven Bereich bewegen, sind die Änderungen in Prozent in Tabelle 4.4 zum Teil schwer zu interpretieren. Deshalb sind die Ergebnisse zusätzlich in Abbildung 4.9 dargestellt.



(a) Sprecher 7T



(b) Sprecher 7X



(c) Sprecher 8A

Abbildung 4.9: Ergebnisse der Differenz der spektralen Steigung: paarweise Anordnung der Ergebnisse für /s/ (links) und /S/ (rechts).

Bei den Sprechern 7T und 8A sind die Werte für /s/ von vor der CI-Versorgung bis ein Jahr danach leicht gesunken. Die Werte für /S/ sind im Gegensatz dazu gestiegen. Der Unterschied in der Differenz der spektralen Steigung ist somit bei beiden Sprechern größer geworden. Bei Sprecher 7X sind sowohl für /s/ als auch für /S/ die Werte gesunken. Da die Werte für /S/ stärker gesunken sind als für /s/, ist der Unterschied in der Differenz der spektralen Steigung zwischen den zwei Sibilanten kleiner geworden.

#### 4.3.2.3 1. spektrales Moment

Die Werte des ersten spektralen Moments verhalten sich im Vergleich vor der CI-Versorgung zu einem Jahr danach bei Sprecher 7T und 7X gleich, sie sanken für /s/ und stiegen für /S/. Bei Sprecher 8A stiegen die Werte bei beiden Sibilanten, bei /S/ jedoch stärker als bei /s/. Das heißt, dass der Abstand der Schwerpunkte von /s/ und /S/ bei allen drei Sprechern von der ersten Aufnahme vor der CI-Versorgung bis zur letzten Aufnahme ein Jahr danach kleiner geworden ist.

### 4.3.3 Diskussion

In dieser Langzeitstudie wurde die Entwicklung der Sibilantenproduktion von postlingual ertaubten Sprechern von vor der CI-Versorgung bis ein Jahr danach untersucht. Nach dem DIVA-Modell von Guenther (z.B: Guenther (2006), siehe Kapitel 2.1) wird die eigene Sprachproduktion sowohl durch eine auditorische als auch durch eine somatosensorische Feedbackschleife während des Sprechens permanent überprüft. Nach der Ertaubung ist das über die auditorische Feedbackschleife nur noch eingeschränkt bis gar nicht mehr möglich. Das hat zur Folge, dass die Patienten Phoneme, in diesem Fall Sibilanten, nicht mehr so gut unterscheiden können und sie deswegen auch immer weniger kontrastiv produzieren. Das heißt in diesem Fall, dass sich /s/ und /S/ nicht mehr so stark unterscheiden. Nach einer Versorgung mit einem Cochlear Implantat erlangen die CI-Träger ihr auditorisches Feedback wieder und können somit ihre produzierten Sibilanten wieder besser kontrollieren. Deshalb wird in Hypothese 08\_b (ein Überblick über die Hypothesen der Langzeitstudie befindet sich am Ende der Diskussion) davon ausgegangen, dass die Distanz zwischen den Mittelwerten von /s/ und /S/ sowohl bei der Frequenz des DCT-geglätteten spektralen Gipfels als auch beim ersten spektralen Moment von vor der CI-Versorgung bis ein Jahr danach immer größer wird.

Die Ergebnisse des spektralen Gipfels im DCT-Spektrum bestätigen diese Hypothese: Bei zwei der drei Sprecher wird der Abstand zwischen den Mittelwerten von /s/ und /S/ innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung im Vergleich zu der Messung vor der Versorgung größer. Innerhalb dieses Jahres wurden große Schwankungen in den Messwerten festgestellt, die wahrscheinlich durch Anpassungen und Änderungen bei der Einstellung des Sprachprozessors bedingt sind. Diese werden bei den Monatskontrollen, an denen die Aufnahmen gemacht wurden, routinemäßig durch einen Audiologen vorgenommen. In dem vorangehenden Vergleich der Sibilantenproduktion von CI-Trägern und normal hörenden Sprechern (Kapitel 4.2) wurde festgestellt, dass die CI-Träger die relevanten Frequenzanteile von /s/ und /S/ in tiefere Frequenzbereiche verlagern, da die Auflösung bei den tieferen Frequenzen besser ist als in höheren Frequenzbereichen. Dieser Trend konnte in dieser Langzeitstudie für die Frequenzen des spektralen Gipfels im DCT-Spektrum nicht nachgewiesen werden. Mit der Ausnahme von /s/ für einen Sprecher sind alle Mittelwerte nach einem Jahr höher als bei der ersten Messung.

Auch bei den Ergebnissen der Differenz der spektralen Steigung wurde bei /S/ ein Trend in Richtung der Werte von normal Hörenden (siehe die Ergebnisse aus Kapitel 4.2.2.2) festgestellt: Die Gipfel in den /S/-Spektren sind innerhalb des ersten Jahres nach der Versorgung im Vergleich zu davor bei zwei der drei Sprecher gestiegen. Das heißt, die Gipfel sind danach ausgeprägter. Die Werte für /s/ sanken. Sie deuten nach wie vor auf sehr flache Spektren hin, was durch einen nicht sehr zielgerichteten Luftstrom bei der Produktion von /s/ zu begründen ist. Insgesamt unterscheiden sich /s/ und /S/ in der Differenz der spektralen Steigung bei zwei der drei Sprecher am letzten Messzeitpunkt deutlicher voneinander als bei der ersten Messung.

Die Resultate für das erste spektrale Moment widersprechen den Ergebnissen der Studien von Matthies et al. (1994), Liker et al. (2007) und Mildner & Liker (2008). Bei allen diesen Studien haben sich die CI-Träger im Verlauf des Aufnahmezeitraumes verbessert. Das heißt die Distanz der Mittelwerte zwischen /s/ und /S/ ist größer geworden. Davon wurde auch in Hypothese 08\_b ausgegangen: Die Distanz zwischen den Mittelwerten von /s/ und /S/ wird sowohl bei der Frequenz des DCT-geglätteten spektralen Gipfels als auch beim ersten spektralen Moment (Schwerpunkt) von vor der CI-Versorgung bis ein Jahr danach größer. Es ist jedoch das Gegenteil der Fall: Die Distanzen zwischen den Mittelwerten der Schwerpunkte von /s/ und /S/ sind ein Jahr nach der Versorgung kleiner als vor der CI-Versorgung. Eine mögliche Begründung dafür ist, dass die CI-Träger so kurz nach der CI-Versorgung mit dem neuen auditorischen Feedback, das sich stark von dem vor der Ertaubung unterscheidet, noch nicht so gut zurecht kommen und die Entwicklung der Sibilantenproduktion länger dauert als ein Jahr. Die durch

die Technik bedingten Einschränkungen treten jedoch nicht bei allen Lauten so deutlich zu Tage wie bei den Sibilanten. Deren relevante Frequenzanteile liegen in höheren Frequenzbereichen als zum Beispiel die relevanten Frequenzanteile von Vokalen. Außerdem sind Frequenzen über 8500Hz für die CI-Träger nicht mehr hörbar. Die Frequenz eines spektralen Gipfels kann jedoch auch bei 10000Hz und höher liegen. Es macht den Anschein, dass postlingual ertaubte Sprecher mit den unterschiedlichen auditorischen Feedbacks vor der Ertaubung und nach der CI-Versorgung große Probleme haben. Die Repräsentationen der Sibilanten in der „Speech Sound Map“ scheinen sich, wie Lane et al. (2007) nachgewiesen haben, sehr schnell anzupassen. Es scheint den CI-Trägern jedoch nicht möglich zu sein, die Sibilanten nach der CI-Versorgung differenzierter zu produzieren als vor der Versorgung. Dass in diesem Fall nicht die Rehabilitationszeit ausschlaggebend ist, zeigen die Ergebnisse aus dem vorangehenden Vergleich zwischen CI-Trägern und normal hörenden Sprechern: Auch hier wurden beim ersten spektralen Moment sehr große Unterschiede zwischen den Gruppen mit postlingual ertaubten CI-Trägern und den jeweiligen Kontrollgruppen gefunden. Die Unterschiede waren größer als bei den prälingual ertaubten Sprechern. Das erklärt zumindest zum Teil auch die Widersprüche zur Literatur: Liker et al. (2007) und Mildner & Liker (2008) haben nur prälingual ertaubte Sprecher untersucht.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die postlingual ertaubten CI-Träger sich zum Teil von vor der Versorgung mit einem Cochlear Implantat bis ein Jahr danach in manchen der untersuchten Parameter verbessern. Die Sibilantenproduktion scheint jedoch für CI-Träger, auch im Hinblick auf die Ergebnisse der vorangehenden Studie (Kapitel 4.2), insgesamt, aber vor allem für die postlingual ertaubten Sprecher, durch die technischen Einschränkungen des Implantats sehr schwierig zu sein.

## Hypothese

---

08_b	Die Distanz zwischen den Mittelwerten von /s/ und /S/ wird sowohl bei der Frequenz des <b>DCT-geglätteten spektralen Gipfels</b> als auch beim <b>ersten spektralen Moment</b> von vor der CI-Versorgung bis ein Jahr danach immer größer.	✓ ✗
------	--	--------

---

Tabelle 4.5: Übersicht über die Hypothesen der Langzeitanalyse der Sibilanten.

# Kapitel 5

## Analyse der Zeitstruktur in komplexen Phonemkombinationen

In diesem Kapitel wird die Zeitstruktur in komplexen Phonemkombinationen bei CI-Trägern untersucht. Nach den vorrangig statischen Analysen von Vokalen (Kapitel 3) und Sibilanten (Kapitel 4) liegt der Fokus dieser Analyse auf Dauerverhältnissen. Objekte der Untersuchung sind die Dauern beziehungsweise Dauerverhältnisse von Konsonanten in komplexen Konsonantenkombinationen im Onset und die Dauer des Vokals direkt danach. Wie in den vorangehenden Kapiteln wird zuerst die Sprachproduktion von CI-Trägern mit der von normal hörenden Sprechern verglichen. Im Anschluss wird in einer Langzeitstudie die Veränderung der untersuchten Zeitstrukturen bei CI-Trägern von vor der CI-Versorgung bis ein Jahr danach untersucht.

### 5.1 Motivation und Forschungsfragen

Die Übergänge vor und nach den bisher untersuchten Phonemen sind Konsonant-Vokaltransitionen, also schnelle Signaländerungen auf silbischem Fundament. Diese entsprechen dem zyklischen Öffnen und Schließen des Vokaltraktes. Bei komplexen Phonemkombinationen beziehungsweise Clustern (einer Gruppe von zwei oder mehr Konsonanten vor (onset), nach (coda) oder zwischen Vokalen (medial)) ist die zeitliche Komplexität größer, weil sie sich auf subsilbischer Ebene bewegt. Bei der Produktion dieser Cluster geht es darum, zeitlich komplexe Abläufe richtig zu koordinieren. Das heißt, dass sowohl die Dauerverhältnisse innerhalb eines Clusters als auch die Dauerverhältnisse des Clusters zum nachfolgenden Vokal konstant gehalten werden müssen.

Die Motivation dafür, die Zeitstruktur von komplexen Phonemkombinationen in der Sprachproduktion von CI-Trägern genauer zu betrachten, ist, dass bisher kaum Literatur mit akustisch-phonetischen Analysen dazu veröffentlicht wurde. Der Grund dafür könnte sein, dass Zeitstrukturen von Cochlear Implantaten sehr gut übertragen werden, und man davon ausgehen könnte, dass sie für CI-Träger deswegen leicht umzusetzen sind. Cluster sind jedoch trotzdem ein interessanter Untersuchungsgegenstand, weil es durchaus sein kann, dass sich artikulatorische Probleme mit Einzellauten, welche bei den Vokalen für prälingual und bei den Sibilanten für postlingual ertaubte CI-Träger gefunden wurden, auf die Zeitstruktur auswirken. Das heißt, dass die Zeitstruktur eventuell nicht so wie sie wahrgenommen wurde, umgesetzt werden kann, weil die Artikulation von einzelnen Phonemen, die für einen CI-Träger schwieriger sind, länger dauert als bei den normal hörenden Sprechern. Somit verschieben sich die Dauerverhältnisse.

Deswegen ist es Gegenstand dieser Studie zu untersuchen, ob die CI-Träger in der Lage sind, innerhalb unterschiedlich komplexer Cluster dieselben Dauerverhältnisse zu produzieren wie die Kontrollgruppensprecher. Im Hinblick auf die vorangehenden Studien werden zusätzlich die Dauern des in dem Cluster enthaltenen Sibilanten /S/ und des auf den Cluster folgenden Vokals (beziehungsweise Diphthongs) in und nach Onsetclustern mit steigender Komplexität analysiert. Als weiteres Maß für die zeitliche Feinstruktur wird die „Voice Onset Time“ (VOT) untersucht. Als Grundlage für die Analysen soll im Folgenden ein Überblick über bisherige Literatur zur Zeitstruktur von komplexen Phonemkombinationen gegeben werden:

Chin untersuchte in zwei Studien die Clusterproduktion von zwölf englischsprachigen Kindern mit mindestens fünf Jahren CI-Tragedauer (Chin & Finnegan (2000), Chin (2006)). Das Ergebnis dieser Studien ist, dass sich die Realisierung von Onsetclustern von CI-Trägern nicht von der normal hörender Kinder unterscheidet. Des Weiteren wurden bei den CI-Kindern dieselben phonologischen Prozesse (zum Beispiel Tilgungen und Epenthese) beobachtet, welche auch bei normal hörenden Kindern in diesem Alter zu erwarten sind. Diese Studie liefert jedoch keine akustisch phonetischen Informationen.

In einer weiteren Studie untersuchten Fulcher und Kollegen die Clusterproduktion von zwölf australischen CI-Kindern im Alter von drei bis vier Jahren (Fulcher et al. (2014)). Sie nahmen sowohl initiale als auch wortfinale Cluster in einem „Ein-Wort-Test“ und in freier Kommunikation während des Spielens auf. Die Resultate sind als Anzahl richtig produzierter Cluster in Prozent angegeben. Es wurden sowohl im Test als auch in der freien Kommunikation mehr wortfinale Cluster richtig produziert als wortinitiale. Alle Ergebnisse der Dreijährigen liegen in einem Prozentbereich, der auch für normal hören-

de Kinder zu erwarten ist. Die vierjährigen CI-Träger waren nur geringfügig unter dem Normbereich für normal hörende Kinder. Auch in dieser Studie wurden jedoch keine akustisch-phonetischen Analysen durchgeführt, sondern nur der Höreindruck bewertet.

Akustisch-phonetische Analysen der Clusterproduktion von CI-Trägern wurden bis jetzt nicht veröffentlicht. Es gibt jedoch ein paar Untersuchungen zu Affrikaten, die zwar nicht die Komplexität von Clustern aufweisen, trotzdem aber dem Bereich subsilbischer Strukturierung zugeordnet werden können. Liker et al. (2007) haben die Produktion von Affrikaten von 18 CI-Trägern im Alter von neun bis 16 Jahren und einer in Alter und Geschlecht passenden normal hörenden Kontrollgruppe untersucht. Es wurden drei Aufnahmen innerhalb eines Jahres durchgeführt. Insgesamt ist über alle Aufnahmetermine festzuhalten, dass die Affrikate der CI-Träger eine höhere Fehlerrate und längere absolute Dauern aufweisen als die der normal hörenden Sprecher. Die Tendenz ist jedoch, dass die Dauern kürzer werden und die falsch produzierten Affrikate weniger. Außerdem wurden Abweichungen in der Zeitstruktur gemessen: Der Anteil von /t/ in den Affrikaten war bei /tS/ um bis zu 10%, bei /ts/ um bis zu 40% größer als bei den Kontrollgruppensprechern. In einer anschließenden Studie wurden dieselben Sprecher drei Jahre später noch einmal aufgenommen (Mildner & Liker (2008)). Der Trend der Studie von Liker et al. (2007) wurde bestätigt: Die absoluten Dauern der Affrikate von CI-Trägern werden mit längerer CI-Tragedauer kürzer und die Fehlerraten geringer. Auf den Daueranteil von /t/ innerhalb eines Affrikats wurde nicht noch einmal eingegangen.

Eine weitere Studie über die Produktion von Affrikaten von CI-Trägern wurde von Chan Shuk-yan durchgeführt (Chan Shuk-yan (2009)). Untersucht wurden 18 kantonnesische CI-Träger im Alter von drei bis sechs Jahren und eine Kontrollgruppe mit normal hörenden Kindern mit gleicher Hörerfahrung. Die zwei untersuchten kantonnesischen Cluster /ts/ und /tsH/ unterscheiden sich durch die Dauer der VOT. Es wurde zwischen CI-Trägern mit zwei Jahren CI-Tragedauer (und einer dazu passenden Kontrollgruppe mit normal hörenden Kindern mit zwei Jahren Hörerfahrung) und CI-Kindern mit vier Jahren CI-Tragedauer und der dazu passenden Kontrollgruppe unterschieden. Beide CI-Gruppen produzierten signifikant kürzere VOT-Dauern als ihre jeweiligen Kontrollgruppen. Die CI- und die Kontrollgruppe mit längerer Hörerfahrung (vier Jahre) produzierten jeweils längere VOT-Dauern als die Gruppen mit zwei Jahren CI-Tragedauer beziehungsweise zwei Jahren Hörerfahrung. Die Fehlerrate bei den produzierten Affrikaten war bei den CI-Trägern mit zwei Jahren CI-Tragedauer noch deutlich schlechter als die ihrer Kontrollgruppe. Die CI-Träger mit vier Jahren CI-Tragedauer wiesen in der Quote von richtig produzierten Affrikaten denselben Entwicklungsstand auf wie ihre normal hörenden Kontrollgruppensprecher mit der gleichen Hörerfahrung.

Die in der Studie von Chan Shuk-yan (2009) untersuchte Voice Onset Time ist als weiteres Maß für die zeitliche Feinstruktur auch Gegenstand der Analysen in diesem Kapitel. Die VOT-Produktion von CI-Trägern wurde von Lane und Kollegen anhand von zwei Studien genauer betrachtet (Lane et al. (1994), Lane et al. (1995)). Bei der ersten Studie von 1994 handelt es sich um eine Langzeitstudie, die die Entwicklung der VOT-Produktion von vor der CI-Versorgung bis zwei Jahre danach untersucht. Die VOT-Dauern, die in dieser Studie gemessen wurden, wurden hinsichtlich der Sprechgeschwindigkeit normalisiert. Alle vier CI-Träger produzierten vor der CI-Versorgung sehr kurze VOT-Dauern, sowohl bei stimmhaften als auch bei stimmlosen Plosiven. Bei drei der vier CI-Träger wurden im Laufe der Studie deutlich längere VOT-Dauern gemessen (der vierte Sprecher verbesserte sich zwar auch, jedoch nicht so deutlich). In der perzeptiven Unterscheidung zwischen stimmlosen und stimmhaften Plosiven wurden zum Ende der Studie hin kaum noch Fehler gemacht. Insgesamt ist den CI-Trägern das Erkennen der Artikulationsstelle (bilabial, alveolar oder velar) schwerer gefallen, wobei diese Differenzierung eher dem spektralen Bereich zuzuordnen ist. Im Gegensatz dazu wird die Stimmhaftigkeit anhand der zeitlichen Einordnung der VOT Dauer unterschieden.

In der zweiten Studie wurde bei zwei Versuchspersonen, die auch an der vorherigen Studie teilgenommen haben, ein Jahr nach Aktivierung des Sprachprozessors die Stabilität der VOT-Produktion untersucht (Lane et al. (1995)). Dafür mussten die CI-Träger ihren Sprachprozessor für 24 Stunden ausschalten. Die erste Aufnahme wurde mit ausgeschaltetem Sprachprozessor durchgeführt; danach zwei weitere mit angeschaltetem Prozessor. Darauf folgten noch einmal zwei weitere Aufnahmen ohne auditorisches Feedback durch den Sprachprozessor. Insgesamt ist über alle Messungen festzuhalten, dass die (normalisierte) VOT von stimmlosen Plosiven bei beiden CI-Trägern stabil gleich lang war; unabhängig davon, ob sie auditorisches Feedback durch den Sprachprozessor hatten oder nicht. Die VOT von stimmhaften Plosiven war bei der ersten Aufnahme mit ausgeschaltetem Sprachprozessor (nach 24 Stunden) so kurz wie vor der CI-Versorgung (Werte aus der Studie von Lane et al. (1994)). Bei den Aufnahmen mit wieder angeschaltetem Sprachprozessor waren sie wieder länger. Insgesamt war die VOT von stimmlosen Plosiven bei beiden CI-Trägern deutlich stabiler als die VOT von stimmhaften Plosiven.

Im Gegensatz dazu maßen Horga & Liker (2006) in einer Studie mit zehn kroatischen CI-Trägern sehr instabile VOT-Dauern bei stimmlosen Plosiven. Diese waren zum Teil im Zeitbereich von stimmhaften Plosiven, also viel zu kurz. In dieser Studie wurden außerdem noch zehn Hörgeräte-Träger und zehn normal hörende Kontrollgruppenspre-



cher untersucht. Insgesamt waren die CI-Träger in der perzeptiven Unterscheidung zwischen stimmhaften und stimmlosen Plosiven besser als die Hörgeräte-Träger. In der Produktion hatten jedoch beide Gruppen Probleme, die zwei Kategorien deutlich zu trennen.

Dieses Ergebnis steht wiederum im Gegensatz zu den Ergebnissen einer Analyse von Uchanski & Geers (2003). Sie verglichen 181 CI-Träger im Alter von ungefähr neun Jahren und mindestens vier Jahren CI-Tragedauer mit 24 normal hörenden Kindern. Das Ergebnis ihrer Studie ist, dass 73% der VOT-Dauern von /t/ und 83% der VOT-Dauern von /d/ innerhalb des Bereichs der produzierten Werte der normal hörenden Sprecher liegen.

Alle soeben vorgestellten Studien haben gemeinsam, dass sich die CI-Träger sowohl bei den Dauern von Affrikaten, die in sich eine komplexe zeitliche Koordinierung erfordern, als auch bei der Voice Onset Time im Laufe der Studien deutlich verbesserten beziehungsweise nach einer längeren CI-Tragedauer den Wertebereich von normal hörenden Sprechern erreichten. Die einzige Ausnahme bildet die Studie von Horga & Liker (2006). Aus dieser Entwicklung kann man anhand des DIVA-Modells (z.B. Guenther et al. (2006), siehe Kapitel 2.1) folgende Entwicklung nachvollziehen: Prälingual ertaubte CI-Träger, die vor der Versorgung mit einem CI wenig bis kein auditorisches Feedback ihrer eigenen Sprachproduktion hatten, können keine stimmlosen und stimmhaften Plosive unterscheiden. Daraus folgt, dass sie diese auch nicht unterschiedlich produzieren können. Bei den postlingual ertaubten CI-Trägern sind zwar Repräsentationen von Sprachlauten und auch deren Zeitstrukturen in der „Speech Sound Map“ gespeichert, jedoch wird die Sprechgeschwindigkeit von Hörgeschädigten durch längere Zeit ohne oder mit kaum auditorischem Feedback immer langsamer (Lane et al. (1994)). Die gespeicherten Strukturen werden außerdem immer unpräziser, da sie nicht mehr korrigiert werden. Nach der Versorgung mit einem Cochlear Implantat steht den CI-Trägern (wieder) auditorisches Feedback zur Verfügung. Das heißt, je nachdem wie gut etwas wahrgenommen werden kann, wird es durch ständige Eigenkontrolle und Korrektur kontinuierlich verbessert. Dass sich die zeitlichen Strukturen der Affrikate und der VOT in den genannten Studien permanent verbesserten und abschließend sogar im Normbereich normal Hörender liegen, lässt darauf schließen, dass Zeitstrukturen durch die Kodierung der Cochlear Implantate sehr gut umgesetzt und von den CI-Trägern gut wahrgenommen werden können.

Basierend auf der Literatur und der Schlussfolgerung anhand des DIVA-Modells liegt der VOT-Analyse dieser Studie folgende Hypothese zugrunde:

#### VOT:

- **Hypothese 13:** CI-Träger, die seit mindestens einem Jahr mit einem CI versorgt sind, unterscheiden sich in normalisierten VOT-Dauern nicht von normal hörenden Sprechern.

Es ist aus zweierlei Hinsicht jedoch trotzdem interessant, die VOT von CI-Trägern zu untersuchen. Bisher gibt es für das Deutsche noch keine Studien dazu, der zweite und viel wichtigere Punkt ist jedoch folgender: Roman et al. (2004) wiesen zwar anhand einer EEG-Studie nach, dass die Wahrnehmung des VOT in einer Gehirnregion verarbeitet wird, die für zeitliche Wahrnehmung zuständig ist, laut Lane & Perkell (2005) kann es jedoch sein, dass auch Faktoren wie subglottaler Druck Auswirkungen auf die VOT haben können, so dass CI-Träger die VOT-Dauern zwar richtig wahrnehmen, aber nicht immer richtig umsetzen können.

Die Hypothese für die Langzeitstudie ist, dass die VOT der CI-Träger bei der ersten Messung vor der CI-Versorgung außerhalb des Wertebereichs für normal hörende Sprecher liegt beziehungsweise zu kurz ist. Es wird erwartet, dass die VOT-Dauern innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung länger werden beziehungsweise in einem Wertebereich liegen, der für normal Hörende anzunehmen ist.

- **Hypothese 13\_b:** CI-Träger weisen vor einer CI-Versorgung im Vergleich zu normal hörenden Sprechern abweichende beziehungsweise kürzere VOT-Dauern auf. Die normalisierte Dauer der VOT von CI-Trägern wird innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung länger beziehungsweise weist Werte auf, die im Normbereich von normal Hörenden liegen.

Diese Hypothese ist darin begründet, dass, wie bereits anhand des DIVA-Modells erläutert wurde, bei postlingual ertaubten Sprechern Sprachlaute und Strukturen aufgrund des fehlenden auditorischen Feedbacks nach der Ertaubung unpräziser werden. Aus den oben erwähnten Studien ist zu entnehmen, dass VOT-Dauern in der Regel kürzer werden. Da Zeitstrukturen mit einem Cochlear Implantat sehr gut wahrnehmbar sind, wird erwartet, dass die Dauern der VOT nach einem Jahr CI-Tragedauer wieder im Wertebereich normal hörender Sprecher liegen.

Die Zeitstrukturen der oben bereits erwähnten Konsonantencluster sollen auf zwei verschiedene Herangehensweisen analysiert werden: Zum einen werden die Dauerverhältnisse von jeweils zwei Konsonanten innerhalb eines zwei- und eines dreigliedrigen Clusters analysiert, zum anderen sollen die Dauer des initialen Sibilanten /S/ und die Dauer des auf den Cluster folgenden Diphthongs untersucht werden. In beiden Fällen wird die Komplexität von einem Phonem im Anlaut zu einem Cluster bestehend aus drei Konsonanten gesteigert. Basierend auf der Überlegung anhand des DIVA-Modells, dass Zeitstrukturen von CI-Trägern sehr gut wahrgenommen werden, liegen der Studie folgende Hypothesen zugrunde:

#### **Zeitstruktur komplexer Phonemkombinationen:**

- **Hypothese 14:** CI-Träger unterscheiden sich in den Dauerverhältnissen von Konsonanten innerhalb eines Konsonantenclusters (unterschiedlicher Komplexität) nicht von normal hörenden Sprechern.
- **Hypothese 15:** CI-Träger unterscheiden sich in der Dauer des initialen Sibilanten in Clustern steigender Komplexität nicht von normal hörenden Sprechern.
- **Hypothese 16:** CI-Träger unterscheiden sich in der Dauer des auf Cluster mit steigender Komplexität folgenden Diphthongs nicht von normal hörenden Sprechern.

Die Untersuchung dieser Hypothesen zur Zeitstruktur innerhalb von komplexen Phonemkombinationen ist, auch wenn keine Unterschiede erwartet werden, wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erwähnt wurde, deswegen interessant, weil sich artikulatorische Probleme bei der Produktion von Einzellauten auf die Zeitstruktur auswirken können.

Bei den postlingual ertaubten Langzeitstudiensprechern ist nach der Theorie des DIVA-Modells davon auszugehen, dass sich die Zeitstrukturen in komplexen Phonemkombinationen in der Zeit zwischen Ertaubung und CI-Versorgung, in der kein oder nur stark eingeschränktes auditorisches Feedback zur Verfügung stand, verändern. Deswegen wird im Folgenden für den Zeitpunkt bei der CI-Versorgung ein Unterschied zwischen CI-Trägern und normal Hörenden angenommen. Aufgrund der guten Übertragung der Zeitstruktur durch die Cochlear Implantate besagen die folgenden Hypothesen des Weiteren, dass sich die CI-Träger nach einem Jahr in der Zeitstruktur von Clustern und dem darauf folgenden Diphthong nicht mehr von den Ergebnissen der normal hörenden Sprecher unterscheiden:

- **Hypothese 14\_b:** CI-Träger weisen vor einer CI-Versorgung im Vergleich zu normal hörenden Sprechern abweichende Dauerverhältnisse innerhalb von Konsonantenclustern (unterschiedlicher Komplexität) auf. Innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung gleichen sich die Zeitstrukturen jedoch denen von normal Hörenden an.
- **Hypothese 15\_b:** CI-Träger unterscheiden sich vor einer CI-Versorgung in der Dauer des initialen Sibilanten in Clustern mit steigender Komplexität von normal hörenden Sprechern. Innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung gleichen sich die Dauern jedoch denen von normal Hörenden an.
- **Hypothese 16\_b:** CI-Träger unterscheiden sich vor einer CI-Versorgung in der Dauer des auf Cluster mit steigender Komplexität folgenden Diphthongs von normal hörenden Sprechern. Innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung gleichen sich die Dauern jedoch denen von normal Hörenden an.

## 5.2 Vergleich CI-Träger und normal hörende Sprecher

In diesem Kapitel wird, wie in den zwei vorangehenden Kapiteln (3 und 4), als erste von zwei Studien ein Vergleich zwischen CI-Trägern und normal hörenden Kontrollgruppensprechern durchgeführt.

Das Kapitel gliedert sich folgendermaßen: Im ersten Abschnitt, der Methode (Kapitel 5.2.1), werden die Versuchspersonen, das Sprachmaterial und die Datenbearbeitung und -auswertung beschrieben. Anschließend folgen, getrennt nach den untersuchten Parametern, die Ergebnisse der Analyse von Zeitstrukturen in komplexen Phonemkombinationen (Kapitel 5.2.2). Abgeschlossen wird dieses Kapitel durch eine Diskussion der Ergebnisse (Kapitel 5.2.3) im Zusammenhang mit den im vorangehenden Abschnitt aufgestellten Hypothesen (siehe Kapitel 5.1) und vorhandener Literatur.

## 5.2.1 Methode

### 5.2.1.1 Sprecher

Die Versuchspersonen, die an dieser Clusteranalyse teilnahmen, sind identisch mit denen aus der vorangehenden Sibilantenanalyse (Kapitel 4.2). Da auch in diesem Kapitel Sibilanten analysiert werden, wurde auch für diese Studie, wie in Abschnitt 4.2.1.1 beschrieben, ein lispelnder Sprecher aus Kontrollgruppe 4 ausgetauscht.

An dieser Clusteranalyse nahmen insgesamt 48 CI-Träger und 48 normal hörende Kontrollgruppensprecher teil. Die Einteilung der CI-Träger in vier Sprechergruppen entspricht der Beschreibung in Kapitel 2.1. Dementsprechend bilden auch die normal hörenden Sprecher vier in Alter und Geschlecht passende Kontrollgruppen. Eine Tabelle mit den Eigenschaften der einzelnen Gruppen, wie Durchschnittsalter und Gruppengröße, ist in Kapitel 3.2.1.1 zu finden. Die Metadaten zu den einzelnen Sprechern sind in Anhang B aufgelistet.

### 5.2.1.2 Sprachmaterial

In dieser Studie wird der Onsetcluster /Str/ analysiert. Das dafür aufgenommene Sprachmaterial besteht aus sechs verschiedenen Zielwörtern, die in Tabelle 5.1 aufgeführt sind. Alle Zielwörter sind zweisilbig, wobei die Wortbetonung auf der ersten Silbe liegt. Die Zielwörter sind in den Trägersatz „Dann ist ... dran.“ eingebettet. Die Satzbetonung liegt jeweils auf dem Zielwort.

Zielphonem(e)	Satz
/Str/	Dann ist 'streiten' dran.
/Sr/	Dann ist 'schreiten' dran.
/tr/	Dann ist 'treiben' dran.
/S/	Dann ist 'scheitern' dran.
/t/	Dann ist 'teilen' dran.
/r/	Dann ist 'reiten' dran.

Tabelle 5.1: Trägersätze und Zielwörter der Clusteranalyse.

Das Sprachmaterial ist wie folgt aufgebaut: Das Zielwort „streiten“ enthält das vollständigen /Str/-Cluster. „Schreiten“ und „treiben“ enthalten Onsetcluster, die aus jeweils zwei Konsonanten des /Str/-Clusters bestehen. Die dritte mögliche Kombination /St/,

wie zum Beispiel in „steigen“, wurde nicht aufgenommen. Die restlichen drei Zielwörter „scheitern“, „teilen“ und „reiten“ haben im Onset jeweils einen der drei Konsonanten aus dem /Str/-Cluster.

Zusammen mit dem in Kapitel 2.2 beschriebenen Sprachmaterial wurden die Sätze der Clusteranalyse in randomisierter Reihenfolge gelesen. Insgesamt wurde jeder Satz sechsmal wiederholt.

### 5.2.1.3 Datenbearbeitung und -auswertung

Diese Analyse der Zeitstruktur in komplexen Phonemkombinationen besteht insgesamt aus drei Untersuchungen. In der ersten wird das Verhältnis von jeweils zwei Phonemen innerhalb eines Clusters von CI-Trägern mit dem von normal hörenden Sprechern verglichen. Das ist zum einen das Verhältnis von /S/ zu /r/ in „streiten“ und „schreiten“ und zum anderen das Verhältnis von /t/ zu /r/ in „streiten“ und „treiben“. Berechnet wird dieses Verhältnis folgendermaßen:

$$\text{Verhältnis} = \frac{\text{normalisierte/S/beziehungsweise/t/-Dauer}}{\text{normalisierte/r/-Dauer}}$$

Beide Phonemkombinationen werden somit in unterschiedlich komplexen Clustern betrachtet. Das Ziel dieser Untersuchung ist, zu überprüfen, ob sich die Zeitstruktur innerhalb eines Clusters bei CI-Trägern und normal Hörenden unterscheidet.

In der zweiten Untersuchung wird die Dauer des wortinitialen Sibilanten /S/ und die Dauer des auf den Cluster folgenden Diphthongs in beziehungsweise nach unterschiedlich komplexen Onsets analysiert. Dabei soll einerseits untersucht werden, ob es Unterschiede zwischen den CI-Trägern und den normal Hörenden gibt, und andererseits, inwiefern sich die unterschiedliche Komplexität der Cluster auf die Dauer des wortinitialen Sibilanten sowie auf die Dauer des auf den Cluster folgenden Diphthongs auswirkt.

In der dritten Untersuchung wird die Produktion der VOT von /t/ in „teilen“ von den CI-Trägern und den normal hörenden Sprechern verglichen.

Die für dieses Kapitel verwendeten Aufnahmen wurden, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, zuerst automatisch vorsegmentiert und anschließend mit Praat (Boersma & Weenink (2001)) manuell nachkorrigiert. Für diese Analyse wurden noch weitere Ebenen hinzugefügt. Relevant für die VOT-Analyse ist die Ebene „POT“ (= „POint Tier“), in der der Stimmeinsatz (SE) nach dem /t/ markiert wird (siehe Abbildung 5.1). Die VOT wurde gemäß ihrer Definition als Intervall von der Verschlusslösung von /t/ in „teilen“ bis zum Stimmeinsatz des darauf folgenden Diphthongs gemessen.

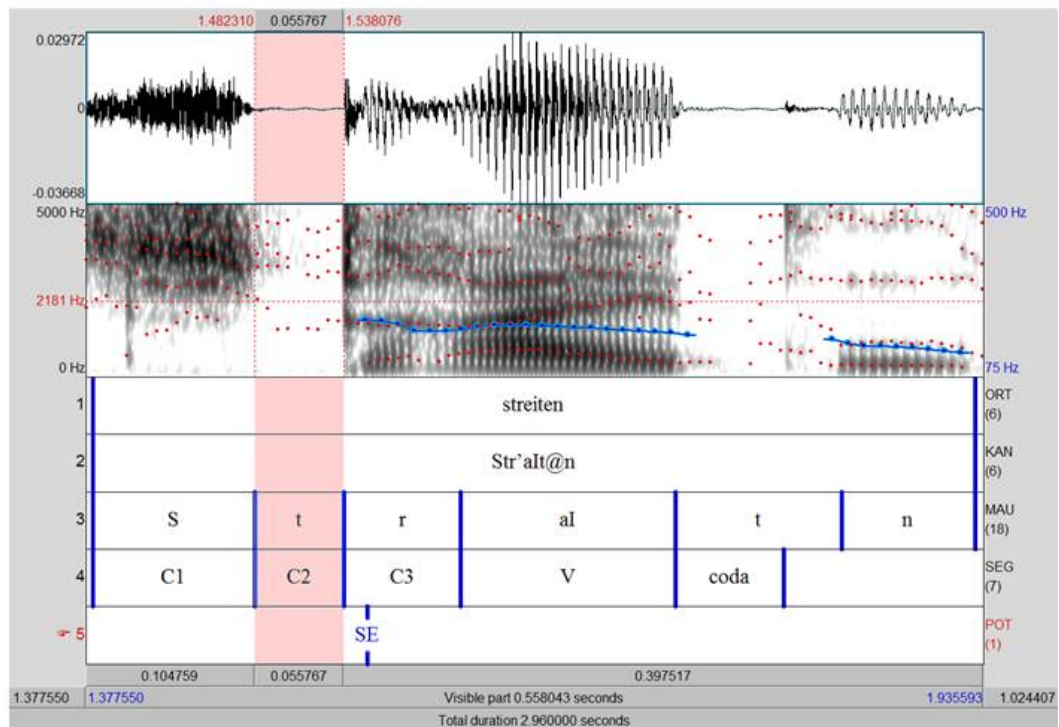


Abbildung 5.1: Beispiel einer Segmentierung von „streiten“ in Praat (Boersma & Weenink (2001)). (Versuchsperson Nr. = 85, Wiederholung = 04)

Eine Besonderheit bei der Segmentierung ist hervorzuheben: Wie in Abbildung 5.1 beispielhaft zu sehen ist, wurde von /t/ immer nur die Verschlussphase segmentiert. Die Verschlusslösung fällt dem darauf folgenden Phonem zu.

Alle im Rahmen dieser Studie untersuchten Dauern werden, wie in den Studien von Lane et al. (1994) und Lane et al. (1995), hinsichtlich der Sprechgeschwindigkeit normalisiert, da Hörgeschädigte in der Regel langsamer sprechen (Horga et al. (2002)) und absolute Werte somit nicht vergleichbar sind.

Die Dauern von /S/ (in „streiten“, „schreiten“ und „scheitern“), von /t/ (in „streiten“ und „treiben“) und von /r/ (in „streiten“ und „schreiten“) sowie die Dauern des auf den Cluster folgenden Diphthongs /aI/ (in „streiten“, „schreiten“ und „reiten“) wurden wie folgt normalisiert:

$$\text{normalisierte Dauer} = \frac{\text{Phonemdauer}}{\text{Wortdauer}}$$

Die normalisierte Phonemdauer entspricht somit dem Verhältnis aus der absoluten Phonemdauer und der absoluten Wortdauer.

### 5.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Verhältnisse von Phonemdauern innerhalb der Cluster sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Die Resultate der einzelnen Phonemdauern beziehungsweise der VOT sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Der Aufbau der Tabellen ist wie folgt: In der mittleren Zeile ist bei jedem Parameter der p-Wert angegeben und im Falle einer Signifikanz fettgedruckt. Zusätzlich wird diese in der obersten Zeile durch einen Punkt beziehungsweise ein bis drei Sternchen markiert. Bei den Verhältnissen innerhalb eines Clusters sind in den unteren Zeilen die Unterschiede zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern in der Dauer von einzelnen Phonemen in Prozent angegeben. Die Ergebnisse der /S/- und Diphthongdauern sind nach Wörtern getrennt aufgeführt, welche nach absteigender Komplexität des Onsets angeordnet sind. Für jeden Parameter, zum Beispiel die Dauer von /S/ in „streiten“, ist die Differenz der Mittelwerte von CI-Trägern und normal hörenden Sprechern in Prozent angegeben. Ist die Änderung in Prozent positiv, bedeutet das, dass die CI-Träger im Vergleich zu ihren Kontrollgruppensprechern größere Werte aufweisen. Umgekehrt steht ein negativer Wert für niedrigere Werte der CI-Träger im Vergleich zu den normal hörenden Sprechern. Für die Ergebnisse der VOT%-Dauern wurden ebenfalls die Unterschiede der Mittelwerte von CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern in Prozent berechnet.

#### 5.2.2.1 Dauerverhältnisse innerhalb des Onsetclusters

Die Ergebnisse der Dauerverhältnisse innerhalb der Cluster sind zusätzlich zu Tabelle 5.2 in Abbildung 5.2 dargestellt.

	CI vs. KG Gruppe 1	CI vs. KG Gruppe 2	CI vs. KG Gruppe 3	CI vs. KG Gruppe 4
Verhältnis /S/:/r/				
„streiten“				
Signifikanz	.	.		*
Änderung in %	<b>0.062</b>	<b>0.084</b>	0.597	<b>0.042</b>
/S/	−3.575%	−23.176%	2.591%	2.746%
/r/	8.919%	1.104%	−4.345%	−16.589%



„schreiten“				
Signifikanz	0.405	0.149	0.229	<b>**</b>
Änderung in %				<b>0.004</b>
/S/	4.893%	15.775%	11.393%	23.187%
/r/	8.292%	1.758%	−12.321%	−11.915%
Verhältnis /t/:/r/				
„streiten“				
Signifikanz	0.41	<b>*</b>	.	<b>**</b>
Änderung in %		<b>0.027</b>	<b>0.076</b>	<b>0.005</b>
/t/	−6.204%	29.748%	44.922%	19.509%
/r/	8.919%	1.104%	−4.345%	−16.589%
„treiben“				
Signifikanz	0.147	0.704	<b>*</b>	0.292
Änderung in %			<b>0.021</b>	
/t/	−3.253%	−22.845%	−31.023%	−10.288%
/r/	8.866%	−13.018%	−4.837%	−21.853%

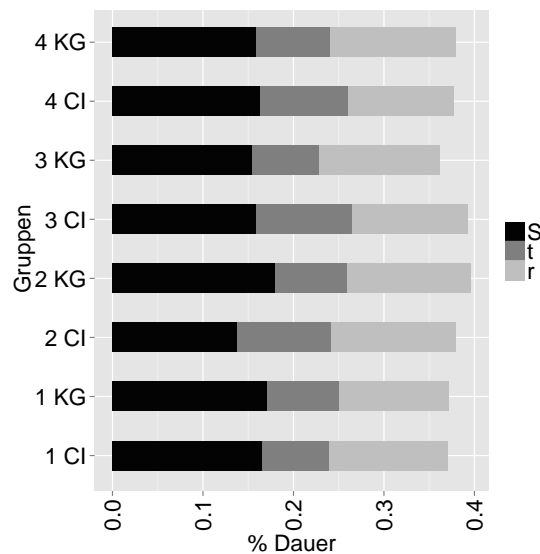
Tabelle 5.2: Ergebnisse der Dauerverhältnisse von /S/ zu /r/ und /t/ zu /r/ innerhalb der Onsetcluster von „streiten“, „schreiten“ und „treiben“: Oberen Zeile: Signifikanz (gegebenenfalls mit einem „. “ bzw. einem bis drei „\* “ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile: Differenzen der Mittelwerte der normalisierten Dauern eines Phonems zwischen CI- und KG-Gruppe getrennt nach Phonemen in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte, negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte).

Das Verhältnis von /S/ zu /r/ wurde anhand des zweigliedrigen Onsets in „schreiten“ und des dreigliedrigen Onsets in „streiten“ untersucht. Für den komplexeren Onset in „streiten“ wurden signifikante Unterschiede zwischen CI-Trägern und normal Hörenden für Gruppe 1, 2 (jeweils schwach) und Gruppe 4 gefunden. Das Verhältnis von /S/ zu /r/ in „schreiten“ ist nur für Gruppe 4 signifikant.

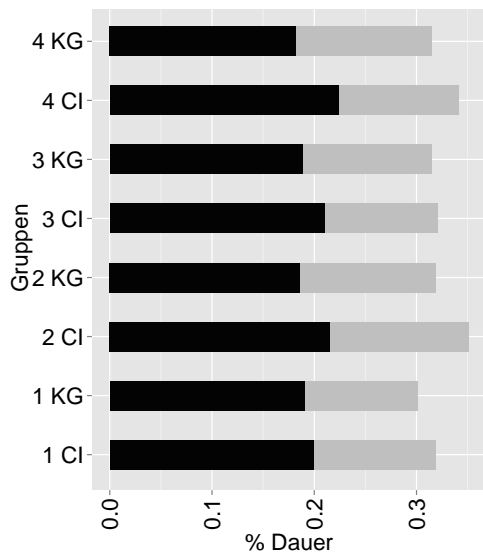
Für das Verhältnis von /t/ zu /r/ wurden ebenfalls im komplexeren Onset von „streiten“ mehr signifikante Unterschiede zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern gefunden. Es gibt signifikante Unterschiede für Gruppe 2, 3 (schwach) und 4. Bei „treiben“

unterscheiden sich nur CI-Träger und normal Hörende der Gruppe 3 signifikant. Das wortinitiale /t/ ist bei allen vier CI-Gruppen kürzer als bei den jeweiligen Kontrollgruppen.

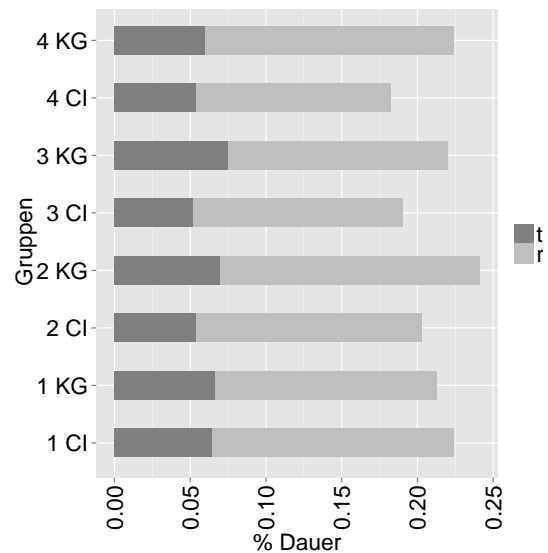
Aus Tabelle 5.2 ist außerdem ersichtlich, dass die normalisierten Dauern von /r/ der postlingual ertaubten CI-Träger der Gruppe 3 und 4 durchgehend kürzer sind als die der Kontrollgruppensprecher.



(a) Dauerverhältnisse der Phoneme „s“, „t“ und „r“ im Onset von „streiten“



(b) Dauerverhältnisse der Phoneme „s“ und „r“ im Onset von „schreiten“



(c) Dauerverhältnisse der Phoneme „t“ und „r“ im Onset von „treiben“

Abbildung 5.2: Ergebnisse der Verhältnisse von normalisierten Phonemauern in den Onsetclustern von „streiten“ (Abbildung (a), oben), „schreiten“ (Abbildung (b), links unten) und „treiben“ (Abbildung (c), rechts unten).

## 5.2.2.2 Relative Dauern

Die hier beschriebenen Dauern sind relative Dauern, weil sie anhand der Wortdauern hinsichtlich der Sprechgeschwindigkeit normalisiert wurden. Deswegen wird im Folgenden nicht mehr von gemessenen Dauern, sondern von Anteilen an der Wortdauer = S%-Dauer beziehungsweise D%-Dauer (= Anteil des Diphthongs an der Wortdauer) und dem Anteil der VOT an der Wortdauer = VOT%-Dauer gesprochen.

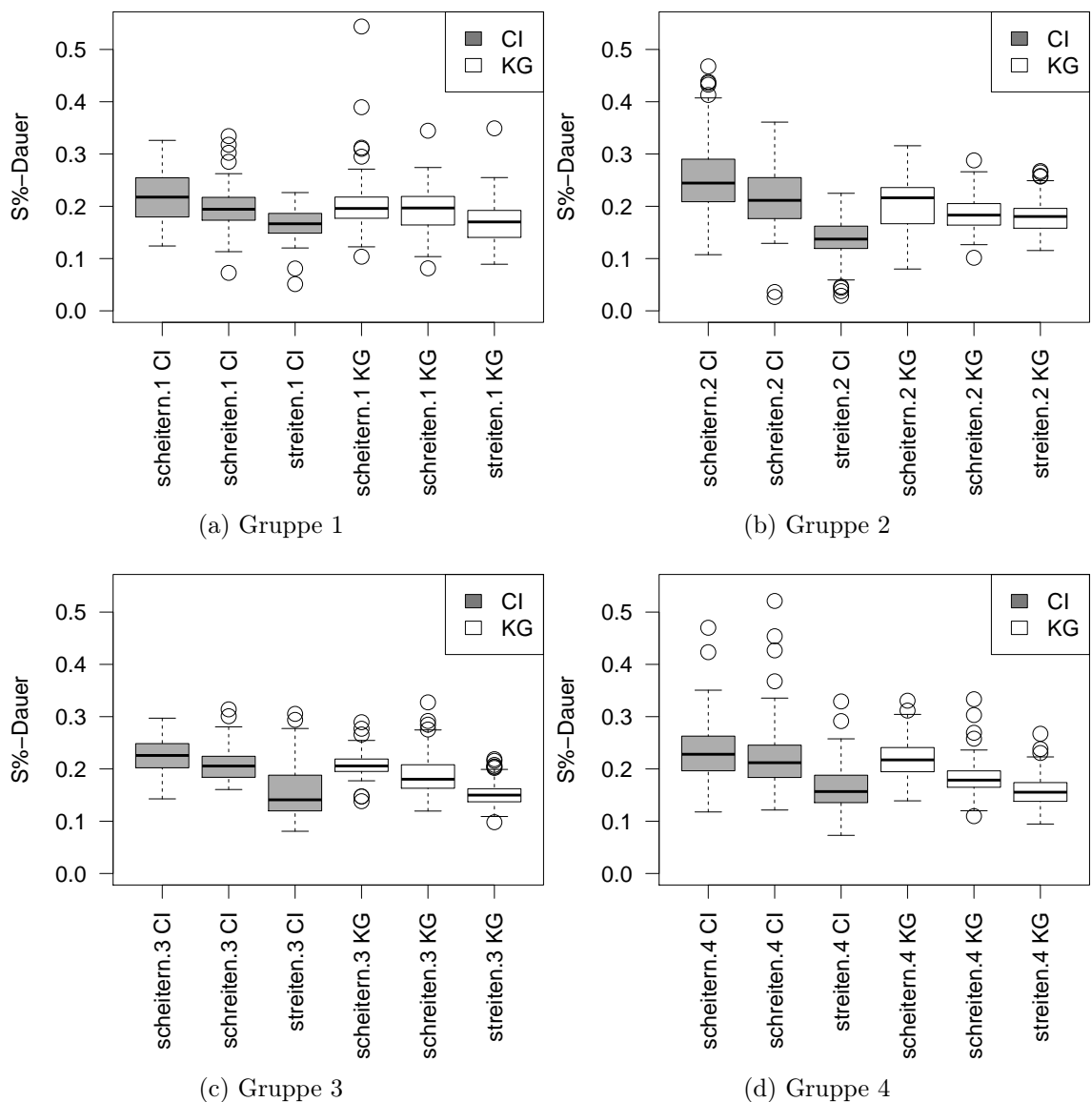


Abbildung 5.3: Ergebnisse der S%-Dauern jeweils getrennt nach Wörtern und CI- vs. Kontrollgruppe. Auflistung der Wörter nach steigender Komplexität des Clusters im Onset.

Aus Abbildung 5.3 und Tabelle 5.3 geht hervor, dass alle S%-Dauern der CI-Träger länger sind als die der normal hörenden Kontrollgruppensprecher. Ausnahmen bilden S% in „streiten“ bei den zwei Gruppen mit prälingual ertaubten Sprechern (Gruppe 1 und 2). Signifikant ist der Unterschied jedoch nur zwischen den CI-Trägern und den Kontrollgruppensprechern der Gruppe 4.

	CI vs. KG Gruppe 1	CI vs. KG Gruppe 2	CI vs. KG Gruppe 3	CI vs. KG Gruppe 4
<b>S%-Dauer</b>				
<b>Signifikanz</b>	—	0.159	0.252	<b>**</b> <b>0.008</b>
<b>Änderung in %</b>				
„streiten“	–3.575%	–23.176%	2.591%	2.746%
„schreiten“	4.893%	15.775%	11.393%	23.187%
„scheitern“	3.087%	25.853%	7.303%	6.865%
<b>D%-Dauer</b>				
<b>Signifikanz</b>	<b>*</b> <b>0.016</b>	<b>*</b> <b>0.037</b>	—	0.384
<b>Änderung in %</b>				
„streiten“	–11.357%	–6.407%	–3.566%	–3.337%
„schreiten“	–18.893%	–12.849%	0.669%	–9.033%
„reiten“	–12.55%	–5.042%	7.289%	–1.052%
<b>VOT%-Dauer von /t/ in /teilen/</b>				
<b>Signifikanz</b>	0.711	<b>.</b> <b>0.064</b>	0.780	<b>*</b> <b>0.027</b>
<b>Änderung in %</b>	4.549%	–15.269%	–3.854%	–18.507%

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Daueranalysen: S%-Dauer, D%-Dauer und VOT%-Dauer (von /t/ in „teilen“): Oberen Zeile: Signifikanzen (gegebenenfalls mit einem „.“ bzw. einem bis drei „\*“ gekennzeichnet) / Mittlere Zeile: p-Werte (falls signifikant: hervorgehoben) / Untere Zeile(n): Differenzen der Mittelwerte des jeweiligen Parameters zwischen CI- und KG-Gruppe getrennt nach Wörtern in Prozent (positiver Wert = CI-Werte > KG-Werte, negativer Wert = CI-Werte < KG-Werte).

Die Ergebnisse der D%-Dauern sind in Abbildung 5.4 zu finden. Aus dieser Abbildung und den Werten in Tabelle 5.3 ist ersichtlich, dass die D%-Dauern der CI-Träger durchgehend kürzer sind als die der jeweiligen Kontrollgruppen. Die einzigen zwei Ausnahmen bilden „schreiten“ und „reiten“ von Gruppe 3. Signifikant unterscheiden sich nur die CI-Gruppen mit den prälingual ertaubten Sprechern (Gruppe 1 und 2) von ihren jeweiligen Kontrollgruppen.

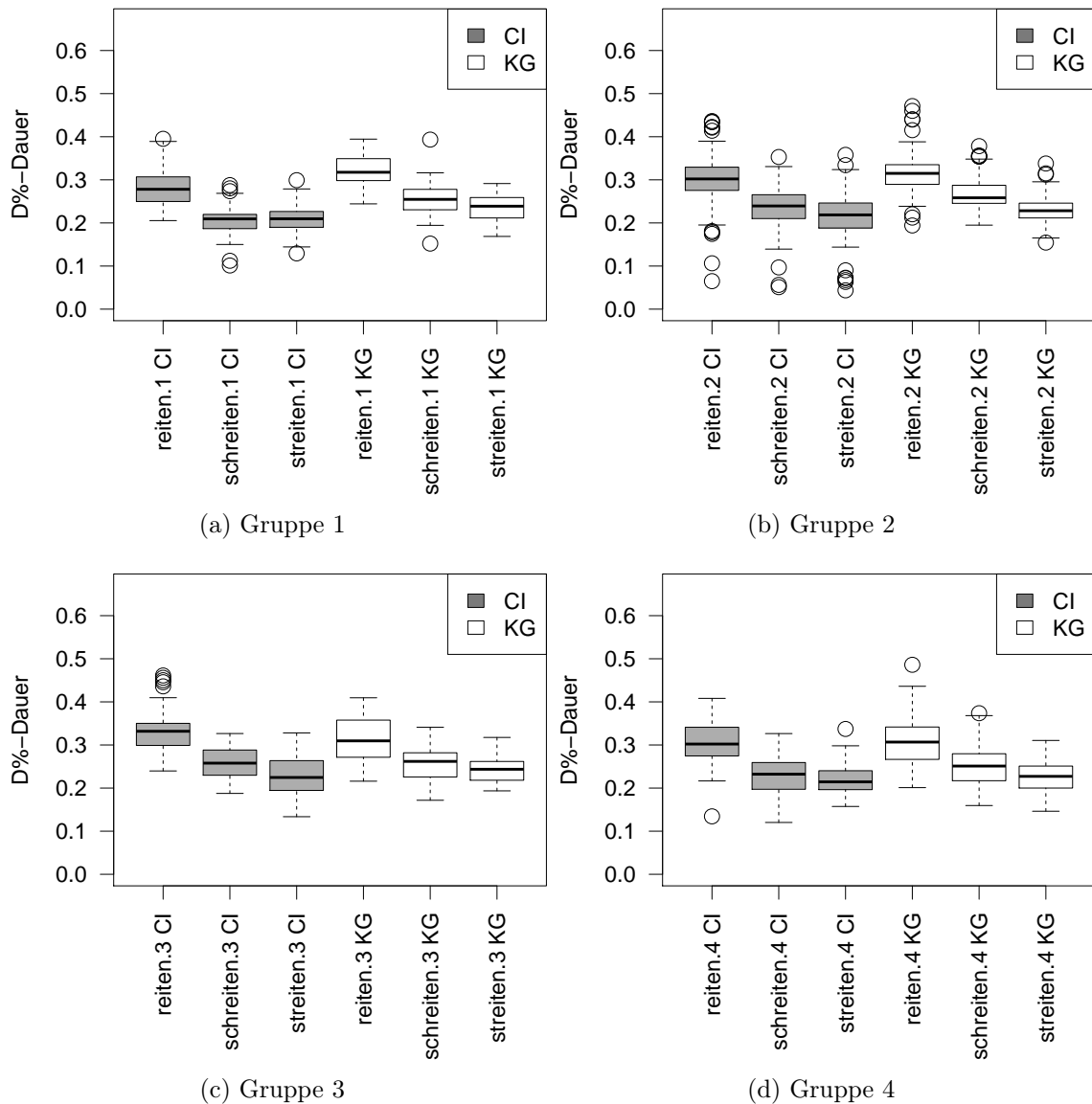


Abbildung 5.4: Ergebnisse der D%-Dauern jeweils getrennt nach Wörtern und CI- vs. Kontrollgruppe. Auflistung der Wörter nach steigender Komplexität des Clusters im Onset.

### 5.2.2.3 Voice Onset Time (VOT)

Der Abbildung 5.5 und Tabelle 5.3 ist zu entnehmen, dass die VOT%-Dauer der CI-Träger mit Ausnahme von Gruppe 1 kürzer ist als die der Kontrollgruppensprecher. In der VOT%-Dauer unterscheiden sich die Gruppen mit den spät versorgten CI-Trägern (= Gruppe 2 (schwach) und Gruppe 4) signifikant von ihren jeweiligen Kontrollgruppensprechern.

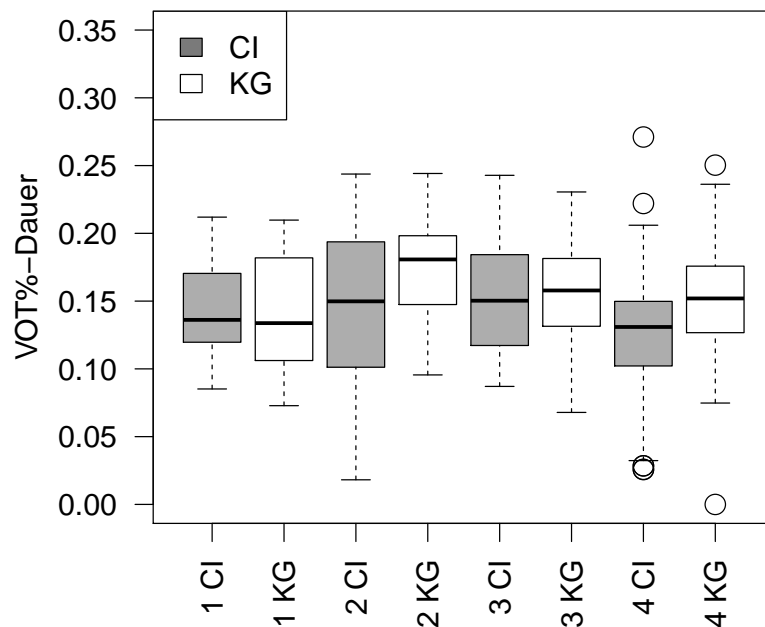


Abbildung 5.5: Ergebnisse VOT%-Dauern von /t/ in „teilen“.

## 5.2.3 Diskussion

Die Ergebnisse der Analyse der Zeitstruktur in komplexen Phonemkombinationen werden in diesem Kapitel im Hinblick auf die vorhandene Literatur diskutiert. Im ersten Unterkapitel liegt der Fokus auf den Dauerverhältnissen innerhalb des Clusters. Im zweiten werden die S%- und D%-Dauern diskutiert. Darauf folgen die VOT%-Dauern und eine Zusammenfassung. Das letzte Unterkapitel 5.2.3.5 enthält sowohl einen Überblick über alle Hypothesen als auch einen Vermerk, ob beziehungsweise für welche Gruppen sie angenommen wurden.

### 5.2.3.1 Dauerverhältnisse innerhalb des Onsetclusters

Die prälingual ertaubten CI-Träger der Gruppe 1, die noch vor dem Spracherwerb mit einem Cochlear Implantat versorgt wurden, unterscheiden sich in den Dauerverhältnissen innerhalb eines Clusters nur bei /tr/ schwach signifikant von ihren normal hörenden Kontrollgruppensprechern. Abgesehen davon wurden für diese Gruppe keine signifikanten Unterschiede gefunden, auch nicht bei höherer Komplexität des Clusters. Daraus kann geschlossen werden, dass die Zeitstruktur durch Cochlear Implantate sehr gut übertragen wird. Einem CI-Träger, der Sprache nie mit einem gesunden Gehör wahrnehmen konnte, scheint es möglich zu sein, Zeitstrukturen richtig wahrzunehmen und auch durch das eigene auditorische Feedback so zu kontrollieren, dass Zeitstrukturen richtig produziert werden. Dieses Ergebnis bestätigt für diese Gruppe Hypothese 14.

Auch die prälingual ertaubten CI-Träger der Gruppe 2 (nach Spracherwerb versorgt) unterscheiden sich in den internen Dauerverhältnissen der Konsonantencluster nicht von ihren Kontrollgruppensprechern, sofern die Cluster nur aus zwei Konsonanten bestehen. Bei größerer Komplexität, wie sie mit drei Konsonanten in /str/ von „streiten“ zu finden ist, scheint es der Fall zu sein, dass sich Probleme bei der Artikulation von Einzellauten auf die Zeitstruktur auswirken. Sowohl bei dem Verhältnis von /S/ zu /r/ als auch beim Verhältnis von /t/ zu /r/ in „streiten“ gibt es für diese Gruppe signifikante Unterschiede zwischen den CI-Trägern und der Kontrollgruppe. Dadurch konnte Hypothese 14 nur zum Teil bestätigt werden.

Auch für Gruppe 3 kann Hypothese 14 nur teilweise bestätigt werden. Die CI-Träger dieser Gruppe unterscheiden sich im Verhältnis /t/ zu /r/ sowohl für „streiten“ als auch für „treiben“ signifikant von den Kontrollgruppensprechern. Für das Verhältnis von /S/ zu /r/ wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden. Die normalisierte Dauer von /t/ ist dabei bei den CI-Trägern in „streiten“ deutlich länger, aber in „treiben“ viel kürzer als bei den Kontrollgruppensprechern. Die CI-Träger scheinen aber nur mit der Länge der Verschlussphase von /t/ Probleme zu haben. In der zudem untersuchten VOT unterscheiden sie sich nicht von normal hörenden Sprechern.

Die CI-Träger der Gruppe 4 unterscheiden sich in drei von vier Dauerverhältnissen signifikant von den Kontrollgruppensprechern. Das könnte daran liegen, dass diese Sprecher mit größerem Abstand zur Ertaubung mit einem Cochlear Implantat versorgt wurden. Zusätzlich ist die Ertaubung meist progredient, also schleichend, über längere Zeit verlaufen. In dieser Zeit wurde das auditorische Feedback immer eingeschränkter und die eigene Kontrolle über die Sprachproduktion immer schlechter. Ein Effekt dessen ist, dass Hörgeschädigte ihre Sprache verlangsamen (Horga et al. (2002)). Zum anderen verändern sich anscheinend auch die Zeitstrukturen, die dann auf diese

Art und Weise auch nach der Wiedererlangung des auditorischen Feedbacks durch eine Versorgung mit einem Cochlear Implantat beibehalten werden. Die Ergebnisse dieser Gruppe widersprechen Hypothese 14, in der angenommen wurde, dass sich CI-Träger in den Dauerverhältnissen von Konsonanten innerhalb eines Clusters nicht von normal hörenden Sprechern unterscheiden.

### 5.2.3.2 Relative Dauern

Das Ergebnis der Untersuchung der relativen **S%-Dauern** ist, dass die normalisierten Dauern der CI-Träger durchgehend länger sind als die der Kontrollgruppensprecher. (Eine Ausnahme bildet S% in „streiten“ von Gruppe 1 und 2.) Das entspricht den Ergebnissen von Liker et al. (2007) und Mildner & Liker (2008), die bei den CI-Trägern längere absolute Dauern der Affrikate maßen. Das ist allerdings nur eine Tendenz und nicht signifikant. Die einzige Ausnahme ist: Für Gruppe 4 mit den postlingual und spät versorgten CI-Trägern wurde ein signifikanter Unterschied gefunden. In diesem Fall trifft die im Zusammenhang mit der Hypothese 15 aufgestellte Vermutung zu: CI-Träger, die bei der Artikulation eines Einzellautes Probleme haben, brauchen für dessen Produktion derart länger, dass sie die Zeitstruktur wie sie von normal Hörenden produziert wird, nicht umsetzen können. Diese Probleme bei der Artikulation wurden für Gruppe 4 in Kapitel 4.2 in der Produktion von Sibilanten nachgewiesen.

Insgesamt wurden die S%-Dauern in Abhängigkeit der Komplexität des Onsets von den CI-Trägern genauso produziert wie von den normal hörenden Sprechern: Die S%-Dauer als Einzellaute in „scheitern“ wurde am längsten produziert und die S%-Dauer im komplexesten Cluster mit drei Konsonanten in „streiten“ am kürzesten. Somit wurde für die S%-Dauern Hypothese 15, die besagt, dass sich CI-Träger (mit Ausnahme von Gruppe 4) in der Dauer des initialen Sibilanten in Clustern steigender Komplexität nicht von normal hörenden Sprechern unterscheiden, bestätigt. Der Grund dafür ist, dass Zeitstrukturen von Cochlear Implantaten sehr präzise übermittelt und somit von CI-Trägern sehr gut wahrgenommen werden.

Die relativen **D%-Dauern** sind mit Ausnahme von „schreiten“ und „reiten“ von Gruppe 3 durchgehend kürzer als die der normal hörenden Sprecher. Das widerspricht den Ergebnissen von Liker et al. (2007) und Mildner & Liker (2008). Bei den Ergebnissen der Dauerverhältnisse war zu beobachten, dass die Gesamtdauer des /Str/-Clusters (Summe der normalisierten Dauern von /S/, /t/ und /r/) bei den CI-Trägern einen größeren Anteil an der Wortdauer einnimmt als bei den normal Hörenden. Gruppe 3 bildet eine Ausnahme. Die kürzeren D%-Dauern der Gruppen 1, 2 und 4 könnten darauf zurückzuführen sein, dass die Dauer des Diphthongs kürzer ist, wenn die Produktion



des Clusters mehr Zeit in Anspruch nimmt. Signifikante Unterschiede in der D%-Dauer wurden nur für die zwei Gruppen mit prälingual ertaubten Sprechern (Gruppe 1 und 2) gefunden.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die normal hörenden Sprecher die D%-Dauer des auf den Cluster folgenden Diphthongs umso kürzer produzierten, je komplexer der Onset ist. Dieses Muster ist auch bei den CI-Trägern zu finden (Ausnahme: „schreiten“ von Gruppe 1).

Bei den postlingual ertaubten CI-Trägern der Gruppen 3 und 4 trifft also Hypothese 16, nach der sich die Dauern eines Diphthongs nach Konsonantenclustern unterschiedlicher Komplexität nicht von denen normal Hörender unterscheiden, zu. Bei den CI-Gruppen mit prälingual ertaubten Sprechern ist dies nicht der Fall. Auch hier scheint die im Zusammenhang mit der Hypothese aufgestellte Vermutung zuzutreffen: Die Artikulation von Phonemen, die für die CI-Träger aufgrund der eingeschränkten Wahrnehmung diffiziler umzusetzen sind, kann eine richtige Realisierung der Zeitstruktur einer komplexen Phonemkombination beziehungsweise des darauf folgenden Diphthongs beeinträchtigen. Für die Sprecher von Gruppe 1 wurden bereits bei den V%-Dauern in der Vokalanalyse (Kapitel 3) im Vergleich zur Kontrollgruppe viel kürzere Dauern gemessen. Das spiegelt sich in den Ergebnissen dieser Studie wider. Für die CI-Träger der Gruppe 2 wurden in der Vokalanalyse allgemein Probleme in der Produktion von Vokalen gefunden, die sich vor allem in signifikanten Unterschieden in F2 und der Größe des Vokalraumes zeigen.

### 5.2.3.3 Voice Onset Time (VOT)

Die **VOT%-Dauern** der CI-Träger sind mit Ausnahme von Gruppe 1 kürzer als die der normal hörenden Kontrollgruppensprecher. Das entspricht den Ergebnissen von Lane et al. (1994) und Horga & Liker (2006). Die Gruppen mit CI-Trägern, die kurz nach der Ertaubung mit einem CI versorgt wurden (Gruppe 1 und 3), bestätigen Hypothese 13, nach der sich CI-Träger, die seit mindestens einem Jahr mit einem CI versorgt sind, in normalisierten VOT-Dauern nicht von normal hörenden Sprechern unterscheiden. Stabile VOT-Dauern von stimmlosen Plosiven werden auch durch die Studie von Lane et al. (1995) bestätigt. Die Gruppen der später versorgten CI-Träger (Gruppe 2 und 4) unterscheiden sich in der VOT%-Dauer signifikant von ihren jeweiligen Kontrollgruppen, Gruppe 2 jedoch nur schwach. Daher konnte für diese beiden Gruppen Hypothese 13 nicht bestätigt werden.

#### 5.2.3.4 Zusammenfassung

Die Erkenntnis, die aus dieser Studie gezogen werden kann, ist folgende: Die Ergebnisse der Gruppe 1 zeigen, dass es CI-Trägern, die vor Spracherwerb ertaubt sind und somit Sprache nie uneingeschränkt wahrnehmen konnten, mit einem Cochlear Implantat möglich ist, Zeitstrukturen richtig wahrzunehmen, diese zu lernen und anhand des eigenen Feedbacks so zu kontrollieren, dass sie sich in der Produktion von Zeitstrukturen nicht von normal Hörenden unterscheiden.

Auch wenn insgesamt festzuhalten ist, dass CI-Träger Zeitstrukturen gut umsetzen können, wird bei den Gruppen 2, 3 und 4 jedoch auch deutlich, dass die korrekte Produktion der Zeitstrukturen beeinträchtigt ist, falls die Artikulation eines einzelnen Phonems für die CI-Träger schwieriger ist und sich aufgrund dessen die Dauerverhältnisse verschieben. Dieses Phänomen zeigt sich mit steigender Komplexität des Onsets umso deutlicher.

#### 5.2.3.5 Überblick Hypothesen

		Gruppe			
		1	2	3	4
<b>13</b>	CI-Träger, die seit mindestens einem Jahr mit einem CI versorgt sind, unterscheiden sich in normalisierten VOT-Dauern nicht von normal hörenden Sprechern.	✓	✗	✓	✗
<b>14</b>	CI-Träger unterscheiden sich in den Dauerverhältnissen von Konsonanten innerhalb eines Konsonantenclusters (unterschiedlicher Komplexität) nicht von normal hörenden Sprechern.	✓	z.T.	z.T.	✗
<b>15</b>	CI-Träger unterscheiden sich in der Dauer des initialen Sibilanten in Clustern steigender Komplexität nicht von normal hörenden Sprechern.	✓	✓	✓	✗
<b>16</b>	CI-Träger unterscheiden sich in der Dauer des auf Cluster mit steigender Komplexität folgenden Diphthongs nicht von normal hörenden Sprechern.	✗	✗	✓	✓

Tabelle 5.4: Übersicht über die Hypothesen der Analyse der Zeitstruktur komplexer Phonemkombinationen (z.T.: die Hypothese konnte nur zum Teil bestätigt werden).

## 5.3 Langzeitstudie

Wie in den vorangehenden Kapiteln 3 und 4 soll auch die Analyse der Zeitstruktur in komplexen Phonemkombinationen nicht nur anhand eines Vergleichs zwischen CI-Trägern und normal hörenden Kontrollgruppensprechern durchgeführt werden. Ergänzend zur Untersuchung der Sprache von CI-Trägern, die seit mindestens einem Jahr mit einem Cochlear Implantat versorgt sind, soll im Folgenden die Entwicklung der Dauerverhältnisse in komplexen Lautverbindungen von CI-Trägern von vor der Versorgung mit einem CI bis ein Jahr danach genauer betrachtet werden. Der Aufbau dieses Kapitels ist dabei wie folgt: zuerst wird auf die der Studie zugrunde liegende Methode eingegangen (Kapitel 5.3.1). Im Anschluss folgt eine Beschreibung der Ergebnisse (Kapitel 5.3.2), welche im letzten Teil dieses Kapitels im Hinblick auf vorhandene Literatur und die Ergebnisse des Vergleichs zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern diskutiert werden (Kapitel 5.3.3).

### 5.3.1 Methode

#### 5.3.1.1 Sprecher

Die Versuchspersonen, die an dieser Langzeitstudie teilnahmen, sind dieselben drei postlingual ertaubten männlichen Sprecher, die auch an der Vokalanalyse (siehe Kapitel 3.3) und der Sibilantenanalyse (siehe Kapitel 4.3) teilgenommen haben. Eine Tabelle mit den Metadaten der Sprecher (Tabelle 3.11) und eine genauere Beschreibung ist in Kapitel 3.3.1.1 zu finden.

In dieser Langzeitstudie sollen die Ergebnisse der Dauerverhältnisse innerhalb der Onsetcluster und der VOT-Analyse mit den Werten normal hörender Sprecher verglichen werden. Dafür wurden alle männlichen Kontrollgruppensprecher aus der vorhergehenden Studie, dem Vergleich zwischen CI-Trägern und normal hörenden Sprechern (Kapitel 5.2), ausgewählt, die im selben Alter sind wie die drei Sprecher der Langzeitstudie. Ihre Metadaten sind in der unten stehenden Tabelle 5.5 zusammengefasst.

VPN-Nummer	Gruppe	Alter	Geschlecht
<b>62</b>	KG_4	61	m
<b>63</b>	KG_4	63	m
<b>83</b>	KG_4	50	m

Tabelle 5.5: Übersicht über die normal hörenden Sprecher (Kontrollgruppe der Langzeitstudie).

### 5.3.1.2 Sprachmaterial

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denen aus der Analyse der Unterschiede zwischen CI-Trägern und normal hörenden Sprechern gewährleisten zu können, ist das Sprachmaterial der Langzeitstudie identisch mit dem der vorangehenden Studie. Kapitel 5.2.1.2 enthält eine detaillierte Beschreibung und eine Tabelle des untersuchten Konsonantenclusters (Tabelle 5.1). Der einzige Unterschied zwischen der vorherigen Studie und dieser Langzeitstudie ist, dass bei der Langzeitstudie aufgrund des größeren Umfangs des gelesenen Materials jeder Satz nur fünfmal wiederholt wurde. Das gesamte Sprachmaterial ist in Kapitel 2.2 beschrieben.

### 5.3.1.3 Datenerhebung

Die Sprachaufnahmen wurden sowohl vor als auch in regelmäßigen Abständen nach der Versorgung eines Patienten mit einem Cochlear Implantat durchgeführt. Die Aufnahmen fanden an folgenden Zeitpunkten statt:

- **prä Aktivierung:** 1-3 Tage nach OP beziehungsweise am Tag der Sprachprozessoraktivierung
- **1 Monat:** 1 Monat nach Aktivierung des Sprachprozessors
- **3 Monate:** 3 Monate nach Aktivierung des Sprachprozessors
- **6 Monate:** 6 Monate nach Aktivierung des Sprachprozessors
- **1 Jahr:** bei der ersten Jahreskontrolle

### 5.3.1.4 Datenbearbeitung und -auswertung

Sowohl die Bearbeitung der Daten als auch die Vorgehensweise bei der Auswertung der einzelnen Parameter entsprechen der Methode des vorangehenden Vergleichs zwischen CI-Trägern und normal hörenden Sprechern. Eine Beschreibung der Methode ist in Kapitel 5.2.1.3 zu finden.

Wie bei den zwei vorangehenden Kapiteln unterscheiden sich die Langzeitstudie und die Analyse von Sprechern mit mindestens einem Jahr CI-Tragedauer in der Statistik. In der Langzeitstudie werden einzelne Aufnahmesitzungen eines Sprechers verglichen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen für eine statistische Berechnung zu wenig Datenpunkte vor. Deshalb werden die Ergebnisse dieser Langzeitstudie deskriptiv ausgewertet.

Bei der Analyse der Dauerverhältnisse innerhalb der Onsetcluster und der VOT-Analyse gibt es jedoch einen Unterschied zur bisherigen Vorgehensweise in den Langzeitstudien: Da die VOT nur beim stimmlosen alveolaren Plosiv untersucht wird, wird ein Normbereich von Werten normal hörender Sprecher berechnet, um die Werte der CI-Träger damit vergleichen und besser einordnen zu können. Für die Analyse der Dauerverhältnisse innerhalb der Cluster wurde aus den Werten der drei Kontrollgruppensprecher pro Dauerverhältnis jeweils ein „Kontroll-Dauerverhältnis“ berechnet, um die Veränderung der Dauerverhältnisse bei den CI-Trägern besser beurteilen zu können.

### 5.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Dauerverhältnisse innerhalb der Onsetcluster sowie die Ergebnisse der S%- und D%-Dauern in unterschiedlich komplexen Clustern und die Ergebnisse der VOT-Analyse werden wie im vorhergehenden Kapitel in getrennten Unterkapiteln beschrieben.

#### 5.3.2.1 Dauerverhältnisse innerhalb des Onsetclusters

In Tabelle 5.6 sind die Ergebnisse der Dauerverhältnisse innerhalb der unterschiedlich komplexen Onsetcluster zusammengefasst. Zusätzlich sind sie in Abbildung 5.6 dargestellt.

Neben den Werten der CI-Träger ist in Tabelle 5.6 auch für jedes Verhältnis das gemittelte Dauerverhältnis der drei Kontrollgruppensprecher angegeben. Es soll als Anhaltspunkt dienen, um die Entwicklung der Dauerverhältnisse bei den CI-Trägern von der ersten Aufnahme vor der CI-Versorgung bis zur letzten Aufnahme, welche ein Jahr danach stattfand, besser einordnen zu können.

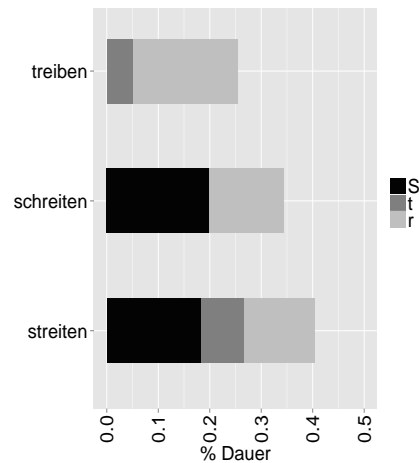
Das Dauerverhältnis von /S/ zu /r/ wurde in „streiten“ bei zwei der drei Sprecher größer (Sprecher 7T und 8A). Die Produktion von Dauerverhältnissen dieser zwei Sprecher hat sich dadurch der normal hörender Sprecher angenähert. Bei „schreiten“ wurde das Dauerverhältnis von /S/ zu /r/ bei allen drei Sprechern größer, da die Dauern von /S/ länger und im Gegensatz dazu die von /r/ deutlich kürzer wurden. Somit haben sich jedoch ihre Dauerverhältnisse von denen der Kontrollgruppensprecher entfernt.

Sprecher Nr.	Verhältnis /S/ : /r/ 0 Monate	Verhältnis /S/ : /r/ 1 Jahr	Änderung in % /S/   /r/	
„streiten“				
Kontrollgruppe	1.341			
7T	0.895	0.996	8.994%	−2.068%
7X	1.041	0.985	5.534%	11.579%
8A	1.173	1.226	5.541%	1.024%
„schreiten“				
Kontrollgruppe	1.379			
7T	1.401	1.931	14.906%	−16.66%
7X	1.355	1.842	3.583%	−23.808%
8A	1.609	1.894	12.474%	−4.447%
Sprecher Nr.	Verhältnis /t/ : /r/ 0 Monate	Verhältnis /t/ : /r/ 1 Jahr	Änderung in % /t/   /r/	
„streiten“				
Kontrollgruppe	0.604			
7T	0.859	0.898	2.377%	−2.068%
7X	0.679	0.416	−31.711%	11.579%
8A	0.834	0.902	9.287%	1.024%
„treiben“				
Kontrollgruppe	0.257			
7T	0.633	0.407	−16.617%	29.574%
7X	0.44	0.447	−3.153%	−4.567%
8A	0.318	0.428	6.04%	−21.091%

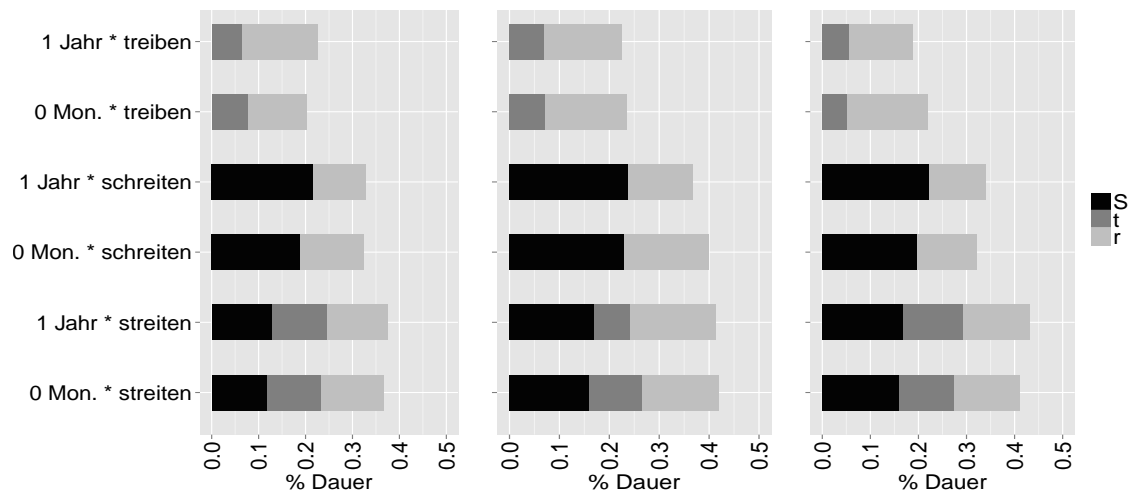
Tabelle 5.6: Ergebnisse der Dauerverhältnisse von /S/ zu /r/ und /t/ zu /r/ innerhalb der Onsetcluster von „streiten“, „schreiten“ und „treiben“ getrennt nach Sprechern (jeweils 1. Zeile = Werte der Kontrollgruppensprecher): Vergleich der Dauerverhältnisse zum Aufnahmezeitpunkt „prä Aktivierung“ und „1 Jahr“ (Spalte 1 / 2). Änderung der Dauern der einzelnen Phoneme in Prozent (Spalte 3 / 4). positiver Wert = Werte nach „1 Jahr“ > Werte zum Zeitpunkt „prä Aktivierung“, negativer Wert = Werte nach „1 Jahr“ < Werte zum Zeitpunkt „prä Aktivierung“.

In „streiten“ wurde das Dauerverhältnis von /t/ zu /r/ wie bei /S/ zu /r/ bei den Sprechern 7T und 8A größer. Dagegen dazu wurde es bei Sprecher 7X kleiner. Die Werte von allen drei Sprechern haben sich von der ersten Aufnahme vor der CI-Versorgung zu der nach einem Jahr CI-Tragedauer erfolgten Aufnahme von denen der normal hörenden Sprecher entfernt. In „treiben“ wird das Verhältnis von /t/ zu /r/ ebenfalls bei zwei Sprechern größer und bei einem Sprecher kleiner (7T). Dieser Sprecher nähert sich

in diesem Fall jedoch dem Verhältnis der normal hörenden Sprecher an, während sich die Dauerverhältnisse der anderen zwei Sprecher nach einem Jahr mehr von denen der Kontrollgruppensprecher unterscheiden als vor der CI-Versorgung.



(a) Kontrollgruppe



(b) Sprecher 7T

(c) Sprecher 7X

(d) Sprecher 8A

Abbildung 5.6: Ergebnisse der Verhältnisse von normalisierten Phonemdauern in den Onsetclustern von „streiten“, „schreiten“ und „treiben“ zu den Aufnahmezeitpunkten „prä Aktivierung“ und „1 Jahr“: Abbildung (a): Werte der Kontrollgruppe/ (b): Sprecher 7T / (c): Sprecher 7X / (d): Sprecher 8A.

Insgesamt werden die Dauerverhältnisse zwischen /S/ und /r/ beziehungsweise zwischen /t/ und /r/ in der Regel größer. Nur bei Sprecher 7X wird sowohl das Dauerverhältnis von /S/ zu /r/ als auch von /t/ zu /r/ in „streiten“ kürzer. Eine weitere Ausnahme bildet das Verhältnis von /t/ zu /r/ in „treiben“ bei Sprecher 7T. Die größeren Dauerverhältnisse kommen vorrangig dadurch zu Stande, dass die Dauern von /r/ kürzer und

die des jeweiligen anderen Phonems länger werden. Aus Abbildung 5.6 ist des Weiteren ersichtlich, dass bei den Kontrollgruppensprechern die Dauern von /t/ in „streiten“ deutlich kürzer sind als die der CI-Träger.

### 5.3.2.2 Relative Dauern

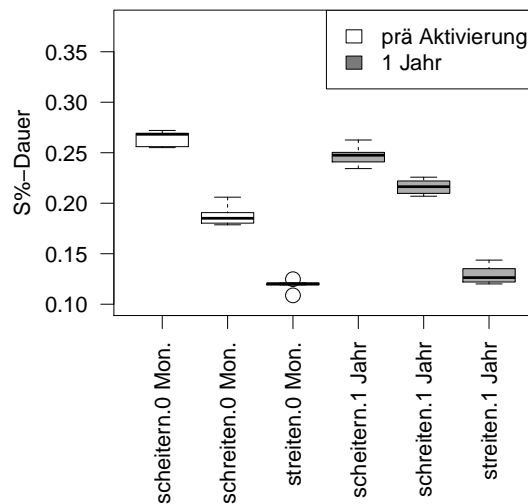
Wie auch in der vorangehenden Studie handelt es sich bei den Ergebnissen dieser Langzeitstudie um relative Dauern. Die absoluten Dauern wurden durch die jeweilige Wortdauer geteilt, um den Faktor Sprechgeschwindigkeit herauszurechnen. Die im Folgenden beschriebenen Werte sind also Anteile an der Wortdauer und werden deshalb als S%-Dauer (relative Dauer von /S/), D%-Dauer (relative Diphthongdauer) und VOT%-Dauer bezeichnet.

Sprecher	Wort	prä Aktivierung	1 Monat nach OP	3 Monate nach OP	6 Monate nach OP	1 Jahr nach OP	Vergleich prä Aktivierung vs. 1 Jahr
<b>S%-Dauern</b>							
7T	„scheitern“	0.264	0.231	0.233	0.239	0.247	−6.433%
	„schreiten“	0.188	0.206	0.198	0.199	0.216	14.906%
	„streiten“	0.119	0.119	0.117	0.128	0.129	8.994%
7X	„scheitern“	0.235	0.231	0.234	0.231	0.244	3.778%
	„schreiten“	0.229	0.224	0.231	0.229	0.238	3.583%
	„streiten“	0.160	0.161	0.157	0.165	0.169	5.533%
8A	„scheitern“	0.268	0.277	0.264	0.271	0.288	7.397%
	„schreiten“	0.198	0.203	0.217	0.215	0.222	12.474%
	„streiten“	0.160	0.147	0.177	0.159	0.169	5.541%
<b>D%-Dauern</b>							
7T	„reiten“	0.291	0.324	0.327	0.319	0.343	17.863%
	„schreiten“	0.215	0.24	0.258	0.252	0.279	29.765%
	„streiten“	0.239	0.216	0.249	0.252	0.267	11.568%
7X	„reiten“	0.383	0.415	0.409	0.417	0.401	4.721%
	„schreiten“	0.229	0.238	0.224	0.249	0.258	12.573%
	„streiten“	0.248	0.249	0.241	0.24	0.254	2.084%
8A	„reiten“	0.399	0.403	0.363	0.357	0.416	4.202%
	„schreiten“	0.293	0.292	0.292	0.279	0.297	1.316%
	„streiten“	0.257	0.269	0.268	0.266	0.253	−1.354%
<b>VOT%-Dauern</b>							
7T	„teilen“	0.183	0.137	0.122	0.138	0.172	−5.985%
7X	„teilen“	0.187	0.188	0.196	0.201	0.213	13.373%
8A	„teilen“	0.209	0.248	0.235	0.239	0.244	16.568%

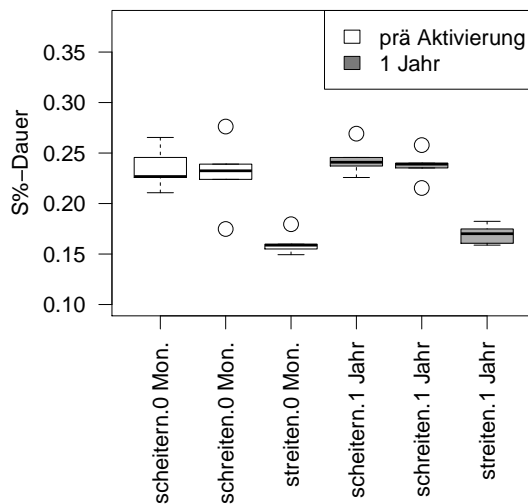
Tabelle 5.7: Ergebnisse der Daueranalysen: S%-Dauer, D%-Dauer und VOT%-Dauer getrennt nach Wörtern und Aufnahmetermen ( „prä Aktivierung“, „1 Monat“, „3 Monate“, „6 Monate“, „1 Jahr“). In der letzten Spalte ist die Änderung der Mittelwerte von der Aufnahme vor Aktivierung des Sprachprozessors zu der nach einem Jahr CI-Tragedauer erfolgten Aufnahme in Prozent angegeben. Positiver Wert: Werte sind gestiegen / negativer Wert: Werte sind gesunken.



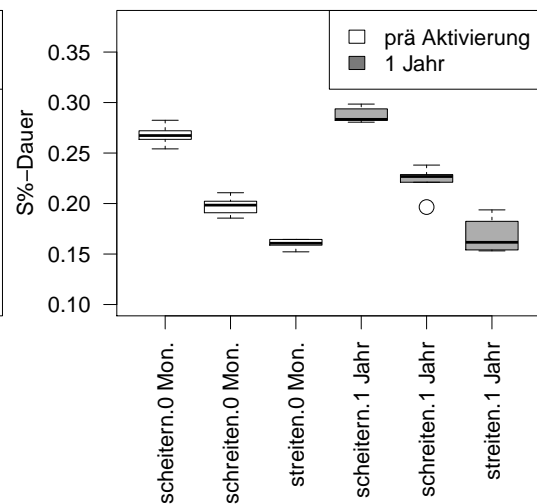
Die Ergebnisse der relativen Dauern sind in Tabelle 5.7 jeweils für jeden Parameter getrennt nach den drei Sprechern zusammengefasst. Zusätzlich sind die Ergebnisse nach den analysierten Wörtern aufgegliedert und immer in aufsteigender Komplexität des Onsets aufgelistet. Die Werte in der Tabelle sind jeweils die Mittelwerte der Wiederholungen pro Aufnahmezeitpunkt. Die Änderung der Mittelwerte von „prä Aktivierung“ bis „1 Jahr nach OP“ in Prozent ist in der letzten Spalte angegeben. Ein positiver Wert steht für einen höheren Wert nach einem Jahr CI-Tragedauer im Vergleich zu vor der Versorgung mit einem Cochlear Implantat. Bei einem negativen Wert ist es umgekehrt.



(a) Sprecher 7T



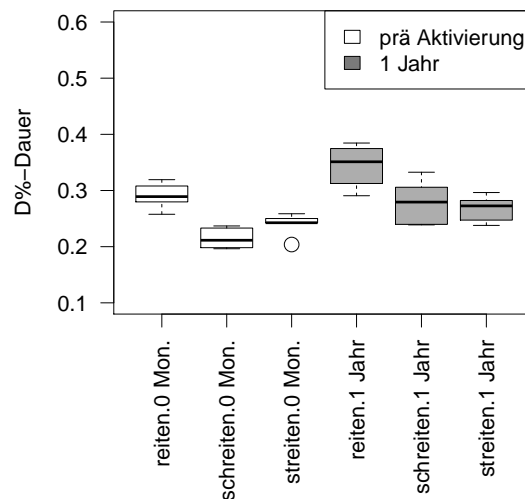
(b) Sprecher 7X



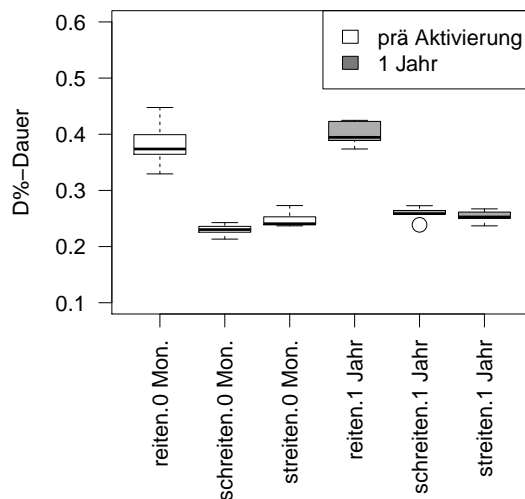
(c) Sprecher 8A

Abbildung 5.7: Ergebnisse S%-Dauern: Anordnung der Wörter nach aufsteigender Komplexität des Onsets.

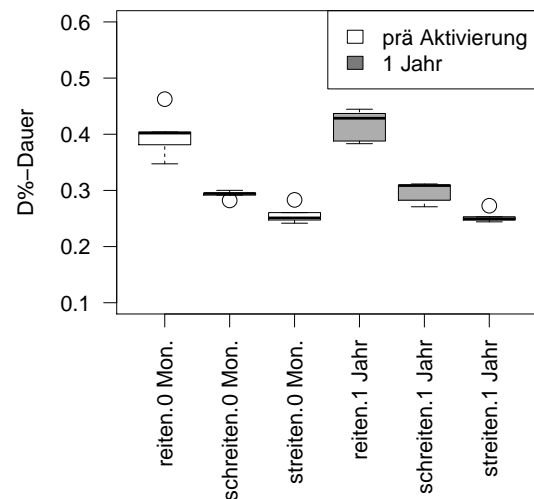
Die Ergebnisse der S%-Dauern sind nach den drei Sprechern getrennt zusätzlich in Abbildung 5.7 dargestellt. Aus Tabelle 5.7 geht hervor, dass bei allen drei Sprechern die S%-Dauern ein Jahr nach Aktivierung des Sprachprozessors länger sind als vor der Aktivierung. Sprecher 7T bildet bezüglich S% in „scheitern“ die einzige Ausnahme. Anhand von Abbildung 5.7 ist ersichtlich, dass die S%-Dauern von „scheitern“ und „schreiten“ von Sprecher 7X sowohl vor der CI-Versorgung als auch ein Jahr danach annähernd gleich sind. Das Ergebnis der anderen zwei CI-Träger, dass die S%-Dauer in „scheitern“ am längsten und die S%-Dauer in „streiten“ am kürzesten ist, entspricht den Ergebnissen der normal hörenden Sprecher aus der vorangehenden Studie (siehe Kapitel 5.2.2.2).



(a) Sprecher 7T



(b) Sprecher 7X



(c) Sprecher 8A

Abbildung 5.8: Ergebnisse D%-Dauern: Anordnung der Wörter nach aufsteigender Komplexität des Onsets.

Auch die Ergebnisse der D%-Dauern sind, bis auf eine Ausnahme (D% in „streiten“ von Sprecher 8A), bei der letzten Aufnahmesitzung durchgehend länger als bei der ersten Aufnahme vor der Versorgung mit einem Cochlear Implantat. In der vorangehenden Studie (siehe Kapitel 5.2.2.2) waren die Ergebnisse der normal hörenden Sprecher folgendermaßen: Die D%-Dauer ist umso kürzer, je komplexer der vorangehende Onsetcluster ist.

Aus Abbildung 5.8 geht hervor, dass die Ergebnisse von Sprecher 7T und 7X nicht dem entsprechen, was in der vorherigen Studie für normal hörende Sprecher gemessen wurde. Die D%-Dauer in „schreiten“ ist bei der ersten Aufnahme jeweils kürzer als in „streiten“. Bei beiden Sprechern ist jedoch eine positive Entwicklung erkennbar.

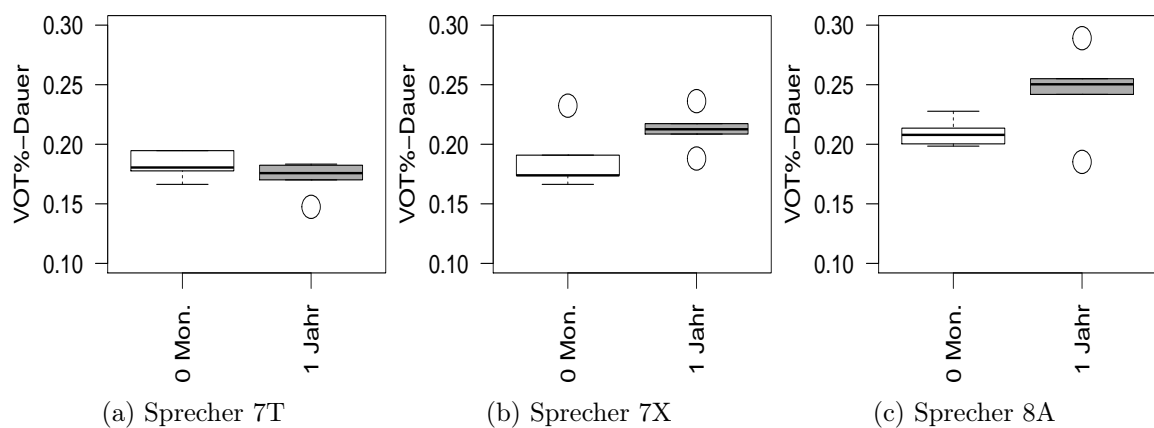
### 5.3.2.3 VOT

Da die VOT in dieser Studie nur beim stimmlosen alveolaren Plosiv untersucht wird, sollen die Werte der CI-Träger mit einem Normbereich von Werten normal hörender Sprecher verglichen werden. Der Normbereich besteht aus allen Werten der drei Kontrollgruppensprecher. Die Werte sind Tabelle 5.8 zu entnehmen.

	<b>normalisierte Dauern VOT%</b>	<b>absolute Dauern (in Sekunden)</b>
<b>Minimum</b>	0.083	0.0422
<b>Maximum</b>	0.236	0.1112
<b>Mittelwert</b>	0.159	0.0789

Tabelle 5.8: Normbereich der VOT-Werte von normal hörenden Sprechern.

Die Ergebnisse der VOT%-Analyse sind in Abbildung 5.9 dargestellt. Dieser Abbildung und Tabelle 5.7 ist zu entnehmen, dass die VOT%-Dauer bei Sprecher 7T von vor der Versorgung mit einem Cochlear Implantat bis ein Jahr danach kürzer wurde. Bei den Sprechern 7X und 8A wurde sie jeweils länger. Alle drei Sprecher hatten bei der ersten Messung vor der CI-Versorgung einen minimalen VOT%-Wert, welcher über dem Mittelwert der Kontrollgruppensprecher liegt. Bei der letzten Aufnahme nach einem Jahr CI-Tragedauer hat sich der Mittelwert von Sprecher 7T, dessen VOT%-Dauer kürzer wurde, dem Mittelwert des Normbereichs angenähert. Der Mittelwert von Sprecher 7X liegt bei der letzten Aufnahme knapp unter, der von Sprecher 8A sogar über dem Maximalwert der normal hörenden Sprecher.



Abbildungung 5.9: Ergebnisse VOT%-Dauern von /t/ in „teilen“ getrennt nach Sprechern. Aufnahmetermine: weiß = „prä Aktivierung“ / grau = „1 Jahr“.

### 5.3.3 Diskussion

Durch die Versorgung mit einem Cochlear Implantat erlangen CI-Träger ein, wenn auch eingeschränktes, auditorisches Feedback ihrer eigenen Sprachproduktion wieder, das sie durch die Ertaubung verloren haben. Nach dem DIVA-Modell von Guenther (z.B: Guenther (2006), siehe Kapitel 2.1) sind bei postlingual ertaubten Sprechern, wie sie an dieser Langzeitstudie teilgenommen haben, zwar auch nach der Ertaubung die vorher erlernten Repräsentationen von Sprachlauten in der „Speech Sound Map“ gespeichert, sie werden jedoch mit der Zeit immer unpräziser, da den Hörgeschädigten die Eigenkontrolle durch die Feedbackschleife fehlt. Das heißt, der Abgleich eines produzierten Lautes beziehungsweise einer Zeitstruktur in der „Auditory State Map“ mit der Repräsentation in der „Speech Sound Map“ durch die „Auditory Error Map“ kann nicht mehr oder kaum noch durchgeführt werden.

Diese Entwicklung ist in dieser Langzeitstudie daran erkennbar, dass die S%-Dauern von Clustern steigender Komplexität bei einem der drei Sprecher vor der CI-Versorgung nicht den S%-Dauern normal hörender Sprecher der vorangehenden Studie entsprechen (Die S%-Dauer ist umso kürzer, je komplexer der Onsetcluster ist. Siehe Ergebnisse der normal hörenden Kontrollgruppensprecher - Kapitel 5.2.2.2). Bei der Analyse der D%-Dauern entsprechen die Ergebnisse von zwei der drei CI-Träger nicht den Erwartungen für normal hörende Sprecher: die Diphthongdauer ist umso kürzer, je komplexer der Onset ist. Nach einem Jahr CI-Tragedauer und einer Rekalibrierung der Repräsentationen in der „Speech Sound Map“ entsprechen sowohl die S%- als auch die D%-Dauern von allen drei Sprechern denen der normal Hörenden. Diese Ergebnisse entsprechen den in Hypothese 15\_b formulierten Erwartungen (ein Überblick über die Hypothesen der Langzeitstudie befindet sich am Ende der Diskussion). Zusätzlich ist die Entwicklung

der Werte dieser Langzeitstudie ein Beweis dafür, dass Dauern durch das Cochlear Implantat sehr gut umgesetzt werden, sonst könnten sich die CI-Träger nicht innerhalb eines Jahres so stark verbessern.

Bei den soeben beschriebenen Ergebnissen wurden der wortinitiale Sibilant und der auf den Cluster folgende Diphthong untersucht. Die Analyse der wesentlich schwierigeren Dauerverhältnisse innerhalb der Onsetcluster kann diesen positiven Trend nicht bestätigen. Die Unterschiede in den Dauerverhältnissen von /S/ zu /r/ als auch von /t/ zu /r/ in zwei- und dreigliedrigen Onsetclustern zwischen CI-Trägern und den Dauerverhältnissen der Kontrollgruppensprecher wurden von vor der Versorgung mit einem Cochlear Implantat bis ein Jahr danach überwiegend größer. Die Gründe für die Unterschiede in den Dauerverhältnissen scheinen dabei sprecherindividuell zu sein. Insgesamt bestätigt dieses Ergebnis die Resultate der vorangehenden Studie (dem Vergleich zwischen CI-Trägern und normal Hörenden (Kapitel 5.2)), dass postlingual ertaubte CI-Träger, die mit einem größeren Abstand zur Ertaubung mit einem CI versorgt wurden, große Probleme mit Dauerverhältnissen innerhalb von Clustern haben. Gleichzeitig wird Hypothese 14\_b, die besagt, dass CI-Träger vor einer CI-Versorgung im Vergleich zu normal hörenden Sprechern abweichende Dauerverhältnisse innerhalb von Konsonantenclustern (unterschiedlicher Komplexität) aufweisen, sich die Zeitstrukturen jedoch innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung denen von normal Hörenden angleichen, widerlegt.

Die VOT%-Dauern wurden bei zwei der drei Sprecher von vor der CI-Versorgung bis ein Jahr danach länger. Das entspricht den Ergebnissen der Studien von Lane et al. (1994) und Lane et al. (1995) und bestätigt Hypothese 13\_b insofern, dass die VOT%-Dauern länger wurden. Den Erwartungen der Hypothese 13\_b widerspricht jedoch, dass sich die Werte dieser zwei CI-Träger gleichzeitig nach oben aus dem Normbereich der normal hörenden Sprecher herausbewegen. Diese Entwicklung weicht auch von den Resultaten einer Untersuchung von Uchanski & Geers (2003) ab, laut welcher 73% der VOT-Dauern von CI-Trägern innerhalb eines Wertebereichs einer Kontrollgruppe liegen. Des Weiteren widersprechen die Ergebnisse denen einer Studie von Kishon-Rabin et al. (1999): In dieser Studie wurden bei den stimmlosen Plosiven bereits vor der CI-Versorgung VOT-Dauern im Wertebereich normal Hörender gemessen. Nur die VOT-Dauern von stimmhaften Plosiven wurden signifikant kürzer.

Das Ergebnis der drei postlingual ertaubten Sprecher dieser Studie lässt vermuten, dass die Autoren von Lane & Perkell (2005) mit ihrer Annahme, dass die Produktion der Voice Onset Time eventuell nicht nur eine zeitliche Komponente aufweist, sondern auch Faktoren wie der subglottale Druck eine Rolle spielen, Recht hatten. Die für die VOT erforderliche Koordination von respiratorischen, phonatorischen und artikulatorischen

Bewegungen ist eventuell zu komplex, um innerhalb einer einjährigen CI-Tragedauer wieder Werte zu erreichen, die im Bereich normal hörender Sprecher liegen. Die postlingual ertaubten Sprecher, die in der Studie von Kishon-Rabin et al. (1999) untersucht wurden, haben erst nach einer Rehabilitationszeit von zwei Jahren stabile Werte erreicht.

## Hypothesen

<b>13_b</b>	CI-Träger weisen vor einer CI-Versorgung im Vergleich zu normal hörenden Sprechern abweichende beziehungsweise kürzere VOT-Dauern auf. Die normalisierte Dauer der VOT von CI-Trägern wird innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung länger beziehungsweise weist Dauern auf, die im Normbereich von normal Hörenden liegen.	<b>z.T.</b>
<b>14_b</b>	CI-Träger weisen vor einer CI-Versorgung im Vergleich zu normal hörenden Sprechern abweichende Dauerverhältnisse innerhalb von Konsonantenclustern (unterschiedlicher Komplexität) auf. Innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung gleichen sich die Zeitstrukturen jedoch denen von normal Hörenden an.	<b>X</b>
<b>15_b</b>	CI-Träger unterscheiden sich vor einer CI-Versorgung in der Dauer des initialen Sibilanten in Clustern mit steigender Komplexität von normal hörenden Sprechern. Innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung gleichen sich die Dauern jedoch denen von normal Hörenden an.	<b>✓</b>
<b>16_b</b>	CI-Träger unterscheiden sich vor einer CI-Versorgung in der Dauer des auf Cluster mit steigender Komplexität folgenden Diphthongs von normal hörenden Sprechern. Innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung gleichen sich die Dauern jedoch denen von normal Hörenden an.	<b>✓</b>

Tabelle 5.9: Übersicht über die Hypothesen der Langzeitanalyse der Zeitstrukturen komplexer Phonemkombinationen (z.T.: die Hypothese konnte nur zum Teil bestätigt werden).

# Kapitel 6

## Zusammenfassende Diskussion und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war, die Sprachproduktion von deutschen CI-Trägern zu untersuchen. Um einen möglichst umfassenden Überblick zu gewinnen, wurden sowohl Vokale als auch Sibilanten untersucht, da sich diese zwei Lautklassen in ihrem relevanten Frequenzbereich stark unterscheiden. Des Weiteren wurden zeitlich komplexe Strukturen anhand von Clustern untersucht, da sich deren Produktion im Gegensatz zu der der zwei anderen Lautkategorien auf der subsilbischen Ebene bewegt und somit wesentlich anspruchsvoller in der Koordination der Artikulatoren ist.

Auch bei den CI-Trägern sollte die Untersuchung möglichst umfassend sein: Dafür wurde in einer Langzeitstudie zum einen die Entwicklung der Sprachproduktion von CI-Trägern von vor der Versorgung mit einem Cochlear Implantat bis zu einem Jahr danach untersucht. Des Weiteren wurde die Sprachproduktion von CI-Trägern (mit mindestens einem Jahr CI-Tragedauer) und normal hörenden Kontrollgruppensprechern verglichen.

Dass CI-Träger eine sehr inhomogene Patientengruppe sind, wird vor allem in der Vokalproduktion durch sehr widersprüchliche Ergebnisse deutlich (Perkell (1992), Liker et al. (2007), Neumeyer et al. (2010)). Um die Unterschiede zwischen den CI-Trägern zu untersuchen, wurden sie im Rahmen dieser Arbeit in vier Sprechergruppen eingeteilt. Die Kriterien sind der Zeitpunkt der Ertaubung (prälingual versus postlingual) und die Dauer zwischen der Ertaubung und der Versorgung mit einem Cochlear Implantat.

## 6.1 Vergleich CI-Träger und normal hörende Sprecher

### 6.1.1 Vokale

Bei der Vokalanalyse wurden neben den klassischen Parametern wie der ersten und zweiten Formantfrequenz (F1 und F2) und der Grundfrequenz (F0) die Flächen der Vokalräume berechnet. Des Weiteren wurden Euklidische Abstände zwischen einzelnen Vokalen gemessen, die der Zungenlage, der Zungenhöhe oder der Lippenrundung zugeschrieben werden können. Die Ergebnisse der Vokalanalyse wurden wie alle anderen Ergebnisse dieser Arbeit anhand der Theorie des DIVA Modells (Directions Into Velocities of Articulators) von Guenther (Guenther (1995), Guenther et al. (1998), Guenther et al. (2006), Guenther (2006)) diskutiert. Die Grundannahme dieses Modells ist, dass Repräsentationen von Sprachlauten im Gehirn (in der „Speech Sound Map“) gespeichert sind. Diese Repräsentationen bilden den „Soll-Zustand“, der während des Sprechvorgangs über eine Feedbackschleife permanent mit dem Gesprochenen (= „Ist-Zustand“) abgeglichen wird. Das dient sowohl der Kontrolle der eigenen Sprachproduktion als auch der permanenten Verbesserung und Festigung der Repräsentationen der Sprachlaute im Gehirn.

Die Analyse von F1 ergab tiefere Werte für die CI-Träger als für die Kontrollgruppensprecher bei allen vier Gruppen. Auch wenn die Ergebnisse für alle vier Gruppen den gleichen Trend aufweisen, müssen sie für prälingual und postlingual ertaubte Sprecher getrennt betrachtet werden. Bei den prälingual ertaubten Sprechern weisen die tieferen F1-Werte auf eine geringere Mundöffnung hin. Das ist dadurch zu erklären, dass CI-Träger Vokale nicht so differenziert wahrnehmen wie normal hörende Sprecher. Prälingual ertaubte Sprecher, die nie mit uneingeschränktem Gehör Vokale gehört haben, haben nach dem DIVA-Modell auch dementsprechend Repräsentationen von weniger differenzierten Vokalen in ihrer „Speech Sound Map“ gespeichert. In diesem Fall überwiegt das Bestreben nach minimalem physiologischem Aufwand beim Sprechen. Das heißt, sie machen den Mund bei der Vokalproduktion nicht so weit auf, was in tieferen F1-Werten resultiert.

Die postlingual ertaubten Sprecher, die mit uneingeschränktem Hörvermögen Sprechen gelernt haben, haben in ihrer „Speech Sound Map“ Repräsentationen von Sprachlauten gespeichert, die dem entsprechen, was sie vor der Ertaubung gehört haben. Das resultiert in dem Bestreben, die Vokale auch nach der CI-Versorgung so zu produ-



zieren. Aufgrund der Tatsache, dass die Spitze des Elektrodenträgers eines Cochlear Implantats nicht bis zum Ende der Cochlear reicht, werden die tiefsten Frequenzen jetzt in einem Bereich stimuliert, in dem vor der Ertaubung höhere Frequenzen durch die Wanderwelle in der Cochlear stimuliert wurden. Das führt dazu, dass sich postlingual ertaubte CI-Träger nach der CI-Versorgung selbst höher wahrnehmen als davor. Die postlingual ertaubten CI-Träger versuchen das zu kompensieren, was in diesem Fall in viel tieferen F1-Werten resultiert.

Eine weitere Folge dieser Kompensation sind tiefere F0-Werte der postlingual ertaubten CI-Träger im Vergleich zu den normal hörenden Sprechern. Bei den prälingual ertaubten CI-Trägern wurde im Vergleich zu den Kontrollgruppensprechern eine höhere Grundfrequenz gemessen. Diese könnte in einer schlechteren Stimmkontrolle der CI-Träger begründet sein. Um das zu überprüfen, wären weitere Analysen, wie zum Beispiel von Jitter und Shimmer nötig, die im Rahmen von zukünftigen Arbeiten sinnvoll wären.

Die Ergebnisse von F2 sind konsistent mit denen der Euklidischen Abstände für die Zungenlage (die F2 zuzuordnen ist). Die Distanzen sind bei den prälingual ertaubten Sprechern kürzer. Bei den postlingual ertaubten Sprechern wurden keine Unterschiede im Vergleich zu den Kontrollgruppensprechern gefunden. Bei einer Betrachtung dieser Ergebnisse, auch im Zusammenhang mit den Ergebnissen der beiden anderen Artikulationsbewegungskoeffizienten Zungenhöhe und Lippenrundung, ist festzuhalten, dass sich die Resultate der postlingual ertaubten Sprecher in diesen Parametern nicht von denen der Kontrollgruppensprecher unterscheiden. Die prälingual ertaubten CI-Träger, die vor Spracherwerb ertaubt sind, scheinen sich bis zu einem gewissen Maß auf Absehen zu stützen, da sie sich in der Zungenlage, die schlecht absehbar ist, vor allem bei den gerundeten Vokalen von den normal hörenden Sprechern unterscheiden. Das wird auch bei der Analyse der Lippenrundung deutlich. Die nach Spracherwerb versorgten prälingual ertaubten CI-Träger unterscheiden sich in F2 und der Zungenlage am deutlichsten von den normal hörenden Sprechern.

Diese Sprechergruppe hat im Vergleich zu den Kontrollgruppensprechern vor allem aufgrund der F2-Werte einen viel kleineren Vokalraum. Das resultiert daraus, dass sie mit stark eingeschränktem beziehungsweise ohne auditorischen Feedback Sprechen gelernt haben. Die Analyse der Vokalräume ist aber auch ein Indiz dafür, dass eine lange Dauer zwischen der Ertaubung und der Versorgung mit einem Cochlear Implantat zu Veränderungen in der Sprachproduktion führt. Sowohl die prälingual als auch die postlingual ertaubten Sprecher, die kurz nach der Ertaubung mit einem Cochlear Implantat

versorgt wurden, haben einen größeren bis gleich großen Vokalraum wie die jeweiligen Kontrollgruppensprecher. Für die CI-Träger (ebenfalls sowohl prä- als auch postlingual ertaubt), die erst längere Zeit nach der Ertaubung mit einem Cochlear Implantat versorgt wurden, wurden wesentlich kleinere Vokalräume errechnet als für normal hörende Sprecher. Anhand des DIVA-Modells lässt es sich so erklären, dass sich die Repräsentationen der Sprachlaute in der „Speech Sound Map“ verändern, wenn keine oder kaum mehr Kontrolle durch die Feedbackschleife stattfinden kann.

### 6.1.2 Sibilanten

Bei den Sibilanten sind die Ergebnisse der CI-Träger sehr einheitlich: Sowohl für den Gipfel im DCT-Spektrum als auch für das erste spektrale Moment wurden für /s/ und /S/ bei den CI-Trägern tiefere Werte gemessen, die zusätzlich näher zusammen liegen als bei den Kontrollgruppensprechern. Die CI-Träger differenzieren demnach nicht so stark zwischen /s/ und /S/ wie normal hörende Sprecher. Die Verlagerung des dominierenden Teils des Spektrums in den tieferen Frequenzbereich resultiert in höheren Werten im dritten spektralen Moment (Schiefe) für die CI-Träger. Gleichzeitig ist der Gipfel im Spektrum bei den CI-Trägern gestaucht und dadurch prominenter, da der dominierende Teil des Spektrums im tieferen Frequenzbereich einen nicht so großen Frequenzbereich abdeckt wie bei den Kontrollgruppensprechern. Das resultiert in höheren Werten für /S/ beim vierten spektralen Moment (Wölbung). Bei allen Messungen unterscheiden sich die Werte der CI-Träger und der Kontrollgruppensprecher in /s/ deutlicher als in /S/. Diese Ergebnisse sind dadurch zu erklären, dass für CI-Träger Frequenzen überhalb von 8500Hz nicht mehr wahrnehmbar sind und die Frequenzauflösung umso schlechter ist, je höher der Frequenzbereich ist. Da die charakteristischen Frequenzen von /s/ höher liegen als die von /S/, sind die Unterschiede zwischen CI-Trägern und Kontrollgruppensprechern bei /s/ größer. Die tieferen Werte der DCT-Gipfel im Spektrum und des ersten spektralen Moments ergeben sich daraus, dass die CI-Träger die Frequenzen in einen für sie besser wahrnehmbaren Frequenzbereich beziehungsweise einen Frequenzbereich mit besserer Auflösung verschieben.

Wie bei der Vokalanalyse müssen die Ergebnisse der prälingual und der postlingual ertaubten CI-Träger jedoch getrennt betrachtet werden. Auch wenn der Trend für beide Sprechergruppen gleich ist, ist jedoch zu beobachten, dass sich die postlingual ertaubten CI-Träger in der Produktion von Sibilanten viel deutlicher und häufiger signifikant von den normal hörenden Sprechern unterscheiden als die prälingual ertaubten Sprecher. Dieses Ergebnis ist darin begründet, dass der relevante Frequenzbereich für die

Sibilanten viel höher liegt als der der Vokale. Bei den Sibilanten sind die technischen Einschränkungen des Cochlear Implantats deutlicher, dementsprechend sind bei den postlingual ertaubten CI-Trägern die Unterschiede zwischen dem auditorischen Feedback der eigenen Sprachproduktion vor der Ertaubung und nach der CI-Versorgung viel größer. Das führt zu einer Verunsicherung der postlingual ertaubten CI-Träger in der Sibilantenproduktion beziehungsweise zu dem Versuch zu kompensieren. Prälingual ertaubte Sprecher haben mit den technischen Einschränkungen weniger Probleme, weil sie Sibilanten nie anders wahrgenommen haben.

### 6.1.3 Zeitstruktur in komplexen Phonemkombinationen

Die Analyse der Zeitstruktur in komplexen Phonemkombinationen wurde in drei Einzelstudien aufgegliedert: Zum einen wurden die Dauerverhältnisse innerhalb von unterschiedlich komplexen Onsetclustern untersucht, zum anderen die relativen Dauern des wortinitialen /S/ in unterschiedlich komplexen Onsetclustern und die relativen Dauern des auf den Cluster folgenden Diphthongs. Zusätzlich wurde die Voice Onset Time analysiert.

Bei den Dauerverhältnissen innerhalb der Cluster wurden zwischen den CI-Trägern, die erst nach längerer Zeit nach der Ertaubung mit einem Cochlear Implantat versorgt wurden, und ihren jeweiligen Kontrollgruppensprechern signifikante Unterschiede gemessen: Die prälingual ertaubten Sprecher, die nach Spracherwerb versorgt wurden, unterschieden sich immer dann von den normal Hörenden, wenn der Cluster maximal komplex war (dreigliedrig). Die postlingual ertaubten Sprecher, die spät versorgt wurden, unterschieden sich in den Dauerverhältnissen insgesamt sehr deutlich von ihren Kontrollgruppensprechern. Daraus kann wie bei den Vokalen geschlossen werden, dass sich die Sprache der Hörgeschädigten in der Zeit zwischen Ertaubung und CI-Versorgung verändert, da die Eigenkontrolle durch das auditorische Feedback fehlt oder stark eingeschränkt ist. Die in dieser Zeit erlernten Muster bleiben auch nach einer CI-Versorgung oft bestehen. Diese Annahme wird auch durch die Ergebnisse der VOT-Analyse bestätigt, bei der nur für die spät versorgten CI-Träger (sowohl prä-, als auch postlingual ertaubt) Unterschiede im Vergleich mit den Kontrollgruppensprechern gefunden wurden.

Bei der Analyse der relativen Dauern haben die CI-Träger jeweils dieselben Muster produziert wie die Kontrollgruppensprecher: Die normalisierte Dauer von /S/ im Cluster ist umso kürzer, je komplexer der Cluster ist. Die Dauer des auf den Cluster fol-

genden Diphthongs ist ebenfalls umso kürzer, je komplexer der vorangehende Cluster ist. Insgesamt ist festzuhalten, dass CI-Träger Zeitstrukturen gut umsetzen können, Probleme bei der Artikulation von Einzellaute können jedoch dazu führen, dass die Dauer dieser Einzellaute abweicht und sich die Dauerverhältnisse somit verschieben. Das tritt bei den prälingual ertaubten CI-Trägern bei den Vokalen auf, bei den postlingual ertaubten CI-Trägern bei den Sibilanten. Dieses Ergebnis ist konsistent mit den Ergebnissen der vorangehenden Kapitel. Die Abweichungen treten umso deutlicher auf, je größer die Komplexität des Clusters ist. Insgesamt wurden für die postlingual ertaubten CI-Träger, die spät mit einem Cochlear Implantat versorgt wurden, die größten Unterschiede im Vergleich zu den normal hörenden Sprechern gefunden.

Abschließend ist bei der Analyse der Zeitstruktur in komplexen Phonemkombinationen vor allem ein Ergebnis hervorzuheben: Die CI-Träger, die vor Spracherwerb ertaubt sind und schnell mit einem Cochlear Implantat versorgt wurden, unterscheiden sich in den Zeitstrukturen nicht von normal hörenden Sprechern (Ausnahme: der auf den Cluster folgende Diphthong). Daraus kann geschlossen werden, dass Cochlear Implantate Zeitstrukturen ohne Einschränkungen übertragen. CI-Trägern, die Zeitstrukturen nie mit uneingeschränktem Hörvermögen wahrnehmen konnten, ist es also möglich, sie mit Hilfe eines Cochlear Implantats richtig wahrzunehmen und auch die eigene Sprachproduktion so zu kontrollieren, dass sie sich in der Produktion von Zeitstrukturen in komplexen Phonemkombinationen nicht von normal hörenden Sprechern unterscheiden.

## 6.2 Langzeitstudie

In der Langzeitstudie wurden dieselben Parameter untersucht wie beim Vergleich zwischen CI-Trägern und normal hörenden Kontrollgruppensprechern. Ziel dieser Untersuchung war es, die Veränderungen der einzelnen Parameter innerhalb des ersten Jahres nach der CI-Versorgung anhand von drei postlingual ertaubten CI-Trägern zu verfolgen.

Bei den Vokalen war anzunehmen, dass der Vokalraum der CI-Träger innerhalb der Zeit zwischen Ertaubung und der Versorgung mit einem Cochlear Implantat kleiner geworden ist und nach der Wiedererlangung des auditorischen Feedbacks wieder größer wird. Das wurde anhand einer Aufnahme vor der CI-Versorgung und einer Aufnahme ein Jahr danach überprüft. Bei allen drei Sprechern ist der Vokalraum jedoch kleiner geworden.

Auch bei den Sibilanten wurde aus den soeben genannten Gründen davon ausgegangen, dass die Distanzen zwischen /s/ und /S/ im ersten spektralen Moment ein Jahr nach der CI-Versorgung größer sein würden als davor. Auch hier war das Gegenteil der Fall.

Nur bei den Analysen der Zeitstrukturen in komplexen Phonemkombinationen haben sich die CI-Träger innerhalb des ersten Jahres deutlich verbessert: Sowohl bei /S/ innerhalb des Clusters als auch beim auf den Cluster folgenden Diphthong produzierten die Kontrollgruppensprecher im Vergleich zwischen CI-Trägern und normal hörenden Sprechern umso kürzere Dauern, je komplexer der Cluster war. Bei der Aufnahme vor der CI-Versorgung wurden bei den CI-Trägern Abweichungen von diesem Muster beobachtet. Nach einem Jahr CI-Tragedauer hat sich die Produktion der Dauern jedoch dem Muster der normal hörenden Sprecher angeglichen.

Insgesamt ist bei dieser Langzeitstudie festzuhalten, dass die Sprechergruppe mit drei Sprechern viel zu klein ist. So musste jeder Sprecher einzeln betrachtet werden. Da die Ergebnisse oft sehr konträr waren, konnte in vielen Fällen kein eindeutiger Trend festgestellt werden. Das Fazit aus dieser Studie, vor allem bei den Vokalen und Sibilanten, ist, dass die Dauer von einem Jahr nicht ausreicht, um die Entwicklung der Sprachproduktion von CI-Trägern von vor der CI-Versorgung bis zu einem Endstadium zu beurteilen. In einer Langzeitstudie von Kishon-Rabin et al. (1999) haben die CI-Träger erst zwei Jahre nach der Versorgung mit einem Cochlear Implantat stabile Werte erreicht.

### 6.3 Ausblick & Schlusswort

Eine Vorgehensweise, die diese Arbeit grundsätzlich von vorherigen Studien unterscheidet, ist die Betrachtung verschiedener Gruppen von CI-Trägern mit jeweils einer eigenen Kontrollgruppe innerhalb einer Studie. Da das methodische Vorgehen jeweils für alle Sprecher gleich ist, wird so eine direkte Vergleichbarkeit der einzelnen Sprechergruppen gewährleistet. Die Gruppeneinteilung hat sich an zwei grundlegenden Kriterien orientiert: dem Zeitpunkt der Ertaubung und der Dauer zwischen der Ertaubung und der CI-Versorgung.

Die Einteilung in prä- und postlingual ertaubte Sprecher hat gezeigt, dass postlingual ertaubte Sprecher im Gegensatz zu prälingual ertaubten zwar vorher erlernte Repräsentationen von Sprachlauten nutzen, wie zum Beispiel bei den Vokalen (siehe Kapitel 3). Auf der anderen Seite unterscheiden sie sich teilweise viel deutlicher von ihren normal

hörenden Kontrollgruppensprechern als prälingual ertaubte CI-Träger, da sie durch den Unterschied zwischen dem auditorischen Feedback vor der Ertaubung und dem auditorischen Feedback nach der CI-Versorgung verstärkt zu kompensieren versuchen. Das konnte sowohl für die erste Formantfrequenz und die Grundfrequenz bei den Vokalen (siehe Kapitel 3) als auch für die Sibilanten (siehe Kapitel 4) nachgewiesen werden.

Auch die Dauer zwischen der Ertaubung und der Versorgung mit einem Cochlear Implantat spielt eine entscheidende Rolle: Sowohl bei den prälingual als auch bei den postlingual ertaubten CI-Trägern zeigt sich deutlich, dass sich eine längere Zeit zwischen Ertaubung und CI-Versorgung negativ auf die Sprachproduktion auswirkt. Im Fall der prälingual ertaubten Sprecher wird die Sprache mit stark eingeschränktem beziehungsweise ohne auditorischen Feedback erlernt, was zum Beispiel an den kaum differenzierten Vokalen deutlich wird (siehe Kapitel 3.2). Diese Repräsentationen, die vor der CI-Versorgung angelegt werden, passen sich zwar nach der Wiedererlangung des auditorischen Feedbacks an, sind aber, wie ebenfalls an den untersuchten Vokalen zu sehen ist, trotzdem nicht so differenziert wie bei den prälingual ertaubten Sprechern, die vor Spracherwerb versorgt wurden. Bei den postlingual ertaubten Sprechern, die spät versorgt wurden, verändert sich die Sprachproduktion in der Zeit ohne auditorisches Feedback vor allem in den Dauern und Zeitstrukturen (siehe Kapitel 5.2). Auch diese Muster bleiben nach einer CI-Versorgung zum Teil bestehen.

Insgesamt hat diese Arbeit gezeigt, dass die CI-Träger, die nie Sprache ohne ein Cochlear Implantat wahrgenommen haben (von Geburt an gehörlose beziehungsweise kurz danach ertaubte CI-Träger, die zeitnah mit einem CI versorgt wurden), sich in ihrer Sprachproduktion kaum von der normal hörender Sprecher unterscheiden. Die Unterschiede, die für diese Sprecher gefunden wurden, sind vor allem durch technische Einschränkungen des Implantats, wie zum Beispiel eine schlechtere Frequenzauflösung, bedingt. Auf der anderen Seite hat sich gezeigt, dass es bei der Zeitstruktur, die von Cochlear Implantaten sehr gut übertragen wird, so gut wie keine Unterschiede zwischen diesen CI-Trägern und normal hörenden Sprechern gibt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es für zukünftige Studien wichtig ist, CI-Träger zumindest nach der in dieser Arbeit vorgenommenen Aufteilung getrennt zu betrachten. Es wäre natürlich grundsätzlich sinnvoll, die Einteilung weiter zu untergliedern und noch mehr Parameter in Betracht zu ziehen. Das war aber im Rahmen dieser Studie aufgrund der Anzahl der Sprecher nicht möglich. Auch für die Langzeitstudie, die in dieser Arbeit nur mit drei postlingual ertaubten Sprechern durchgeführt wurde, wäre eine Erweiterung auf verschiedene Sprechergruppen mit einer jeweils größeren Anzahl an Sprechern wünschenswert.

Für zukünftige Studien mit CI-Trägern wäre es interessant, die Stimme zu untersuchen, da sich bei den Ergebnissen der Grundfrequenz und der Intrinsischen Dynamik gezeigt hat, dass es bei den CI-Trägern Unterschiede in der Stimmkontrolle gibt. Dafür wären zum Beispiel Analysen von Jitter und Shimmer möglich. Darauf aufbauend wäre es weiterhin wichtig, auch die Intonation von CI-Trägern zu untersuchen, da dieser Punkt in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt wurde und bis jetzt wenig dazu veröffentlicht wurde.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Sibilantenanalyse wäre es sinnvoll, weitere Frikative zu untersuchen. Die für /s/ und /S/ relevanten Frequenzen wurden von den CI-Trägern aufgrund einer Art Kompensierungsstrategie stark abgesenkt. Da stellt sich zum einen die Frage, inwiefern und in welchem Ausmaß das bei Frikativen der Fall ist, die einen noch höheren Frequenzschwerpunkt haben, wie zum Beispiel /f/, zum anderen, ob diese Kompensation auch bei dorsalen Frikativen wie /C/ und /x/ stattfindet, deren Frequenzschwerpunkte in einem besser aufgelösten Frequenzbereich liegen.

Diese und zukünftige Studien bilden eine wichtige Grundlage für die weitere Verbesserung von Cochlear Implantaten und die sprachtherapeutische Betreuung von CI-Trägern durch Logopäden. Es gilt abschließend jedoch zu betonen: Trotz aller Unterschiede zwischen CI-Trägern und normal Hörenden, die in dieser Arbeit gefunden wurden, hat der persönliche Kontakt zu den CI-Trägern bei den Sprachaufnahmen und mehreren Treffen in Selbsthilfegruppen oder am CI-Tag gezeigt, dass Hörgeschädigten durch ein Cochlear Implantat eine Sprachproduktion möglich ist, die für uns alle sehr gut verständlich war.

# Literaturverzeichnis

- Bates, D., Maechler, M., & Bolker, B. (2012). lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and Eigenfaces. (R package version 0.999999-2).
- Binnie, C., Daniloff, R., & Buckingham, H. (1982). Phonetic disintegration in a five-year-old following sudden hearing loss. *Journal of Speech and Hearing Disorders* 47, 181–189.
- Boersma, P. & Weenink, D. (2001). Praat, a system for doing phonetics by computer. *Glott International* 5, 341–345.
- Chan Shuk-yan, C. (2009). Production of affricate consonant by Cantonese-speaking Pediatric cochlear implant users. Bachelor thesis, University of Hong Kong.
- Chin, S. B. (2006). Realization of complex onsets by pediatric users of cochlear implants. *Clinical Linguistics & Phonetics* 20(7-8), 501–508.
- Chin, S. B. & Finnegan, K. R. (2000). Consonant cluster production by pediatric users of cochlear implants. *The Volta Review* 102(4), 157–174.
- Cochlear Deutschland GmbH & Co. KG (2015). Cochlea-Implantat (CI) - Funktionsweise. Online-Quelle, abgerufen am: 25.02.2015.
- Deutsche Cochlear Implant Gesellschaft (DCIG). 10. CI-Tag - ein kleines Jubiläum! (Newsarchiv: 02.02.2015). Online-Quelle, abgerufen am: 24.02.2015.
- Deutsche Cochlear Implant Gesellschaft (DCIG). Med-el-Gründer erhalten Russ Prize 2015 (Newsarchiv: 14.01.2015). Online-Quelle, abgerufen am: 25.02.2015.
- Draxler, C. & Jänsch, K. (2004). Speechrecorder - a universal platform independent multi-channel audio recording software. *Proceedings of the IV.th International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC)*.
- Evers, V., Reetz, H., & Lahiri, A. (1998). Crosslinguistic acoustic categorization of sibilants independent of phonological status. *Journal of Phonetics* 26(4), 345–370.
- Forrest, K., Weismer, G., Milenkovic, P., & Dougall, R. (1988). Statistical analysis of word-initial voiceless obstruents: preliminary data. *Journal of the Acoustical Society of America* 84(1), 115–124.
- Fryauf-Bertschy, H. & Tyler, R. S. (1997). Cochlear implant use by prelingually dea-



- fened children: influences of age at implant and length of device use. *Journal of Speech, Language & Hearing Research* 40(1), 183–199.
- Fulcher, A., Baker, E., Purcell, A., & Munro, N. (2014). Typical consonant cluster acquisition in auditory-verbal children with early-identified severe/profound hearing loss. *International Journal of Speech-Language Pathology* 16(1), 69–81.
- Guenther, F. H. (1995). Speech sound acquisition, coarticulation, and rate effects in a neural network model of speech production. *Psychological Review* 102(3), 594–621.
- Guenther, F. H. (2006). Cortical interactions underlying the production of speech sounds. *Journal of Communication Disorders* 39(5), 350–365.
- Guenther, F. H., Ghosh, S. S., & Tourville, J. A. (2006). Neural modeling and imaging of the cortical interactions underlying syllable production. *Brain and Language* 96(3), 280–301.
- Guenther, F. H., Hampson, M., & Johnson, D. (1998). A theoretical investigation of reference frames for the planning of speech movements. *Psychological Review* 105(4), 611–633.
- Harrington, J. (2010). *The Phonetic Analysis of Speech Corpora*. (1 Aufl.). Wiley-Blackwell.
- Horga, D. & Liker, M. (2006). Voice and pronunciation of cochlear implant speakers. *Clinical Linguistics & Phonetics* 20(2-3), 211–217.
- Horga, D., Mildner, V., & Sindija, B. (2002). Temporal parameters of speech in the hearing-impaired children. *Proceedings of the Conference of the Clinical Linguistics and Phonetics Association (ICPLA)*.
- Ibertsson, T., Sahlen, B., & Löfqvist, A. (2008). Vowel spaces in Swedish children with cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America* 123(5), 3330.
- Jesus, L. M. & Shadle, C. H. (2002). A parametric study of the spectral characteristics of European Portuguese fricatives. *Journal of Phonetics* 30(3), 437–464.
- Jongman, A., Wayland, R., & Wong, S. (2000). Acoustic characteristics of English fricatives. *The Journal of the Acoustical Society of America* 108(3), 1252–1263.
- Kishon-Rabin, L., Taitelbaum, R., Tobin, Y., & Hildesheimer, M. (1999). The effect of partially restored hearing on speech production of postlingually deafened adults with multichannel cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America* 106(5), 2843.
- Kramme, R. (2007). *Medizintechnik* (3 Aufl.). Springer Medizin Verlag, Heidelberg.
- Lane, H. (2001). The Effects of Changes in Hearing Status in Cochlear Implant Users on the Acoustic Vowel Space and CV Coarticulation. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 44(3), 552–563.
- Lane, H., Matthies, M. L., Guenther, F. H., Denny, M., Perkell, J. S., Stockmann, E., Tiede, M., Vick, J., & Zandipour, M. (2007). Effects of short- and long-term changes

- in auditory feedback on vowel and sibilant contrasts. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 50, 913–927.
- Lane, H. & Perkell, J. S. (2005). Control of voice-onset time in the absence of hearing. *Journal of Speech Language and Hearing Research* 48(6), 1334–1343.
- Lane, H., Wozniak, J., Matthies, M., Svirsky, M., & Perkell, J. (1995). Phonemic resetting versus postural adjustments in the speech of cochlear implant users: An exploration of voice-onset time. *The Journal of the Acoustical Society of America* 98(6), 3096–3106.
- Lane, H., Wozniak, J., & Perkell, J. (1994). Changes in voice-onset time in speakers with cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America* 96(1), 56–64.
- Langereis, M., Bosman, A., van Olphen, A., & Smoorenburg, G. (1997). Changes in vowel quality in post-lingually deafened cochlear implant users. *Audiology* 36(5), 279–297.
- Leder, S., Spitzer, J., & Kirchner, J. (1987). Speaking fundamental frequency of postlingually profoundly deaf adult men. *Annals of Otology, Rhinology, and Laryngology* 96, 322–324.
- Leder, S. B. & Spitzer, J. B. (1990). Longitudinal effects of single-channel cochlear implantation on voice quality. *The Laryngoscope* 100(4), 395–398.
- Leder, S. B. & Spitzer, J. B. (1993). Speaking fundamental frequency, intensity, and rate of adventitiously profoundly hearing-impaired adult women. *The Journal of the Acoustical Society of America* 93(4), 2146.
- Leonhardt, A. (2002). *Einführung in die Hörgeschädigtenpädagogik*. (2 Aufl.). München: Ernst Reinhardt Verlag.
- Liker, M., Mildner, V., & Sindija, B. (2007). Acoustic analysis of the speech of children with cochlear implants: A longitudinal study. *Clinical Linguistics & Phonetics* 21(1), 1–11.
- Löfqvist, A., Sahlen, B., & Ibertsson, T. (2010). Vowel spaces in swedish adolescents with cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America* 128(5), 3064–3069.
- Maniwa, K., Jongman, A., & Wade, T. (2009). Acoustic characteristics of clearly spoken english fricatives. *The Journal of the Acoustical Society of America* 125(6), 3962–3973.
- Matthies, M. L., Svirsky, M., Perkell, J., & Lane, H. (1996). Acoustic and articulatory measures of sibilant production with and without auditory feedback from a cochlear implant. *Journal of Speech & Hearing Research* 39(5), 936.
- Matthies, M. L., Svirsky, M. A., Lane, H. L., & Perkell, J. (1994). A preliminary study of the effects of cochlear implants on the production of sibilants. *The Journal of the Acoustical Society of America* 96(3), 1367–1373.

- MED-EL Elektromedizinische Geräte Gesellschaft m.b.H. SYNCHRONY Cochlear Implant System. Online-Quelle: abgerufen am 25.02.2015.
- MED-EL Elektromedizinische Geräte Gesellschaft m.b.H. Unsere Geschichte. Online-Quelle, abgerufen am: 24.02.2015.
- Menard, L., Polak, M., Denny, M., Burton, E., Lane, H., Matthies, M. L., Marrone, N., Perkell, J. S., Tiede, M., & Vick, J. (2007). Interactions of speaking condition and auditory feedback on vowel production in postlingually deaf adults with cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America* 121(6), 3790–3801.
- Mildner, V. & Liker, M. (2008). Fricatives, affricates, and vowels in Croatian children with cochlear implants. *Clinical Linguistics & Phonetics* 22(10-11), 845–856.
- Neumeyer, V., Harrington, J., & Draxler, C. (2010). An acoustic analysis of the vowel space in young and old cochlear-implant speakers. *Clinical Linguistics & Phonetics* 24(9), 734–741.
- Oster, A. (1987). Some effects of cochlear implantation on speech production. Quarterly progress status report, Speech Transmission Laboratory.
- Perkell, J. (1992). Speech of cochlear implant patients: A longitudinal study of vowel production. *The Journal of the Acoustical Society of America* 91(5), 2961–2978.
- Perkell, J. S., Denny, M., Lane, H., Guenther, F., Matthies, M. L., Tiede, M., Vick, J., Zandipour, M., & Burton, E. (2007). Effects of masking noise on vowel and sibilant contrasts in normal-hearing speakers and postlingually deafened cochlear implant users. *The Journal of the Acoustical Society of America* 121(1), 505–518.
- Perkell, J. S., Matthies, M. L., Tiede, M., Lane, H., Zandipour, M., Marrone, N., & Stockmann, E. (2004b). The distinctness of speakers s-S contrast is related to their auditory discrimination and use of an articulatory saturation effect. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 47, 1259–1269.
- Peterson, G. E. & Barney, H. L. (1952). Control methods used in a study of the vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America* 24(2), 175.
- Roman, S., Canevet, G., Lorenzi, C., Triglia, J.-M., & Liegeois-Chauvel, C. (2004). Voice onset time encoding in patients with left and right cochlear implants. *Neuro-Report* 15(4), 601–605.
- Schenk, B. S., Baumgartner, W.-D., & Hamzavi, J. S. (2003). Changes in vowel quality after cochlear implantation. *ORL* 65(3), 184–188.
- Schiel, F. (1999). Automatic phonetic transcription of non-prompted speech. *Proceedings of the 14th International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS)*, 607–610.
- Sevens, K. N. (1998). *Acoustic Phonetics* (1 Aufl.). MIT Press.
- Summers, W. & Leek, M. (1992). The role of spectral and temporal cues in vowel identification by listeners with impaired hearing. *Journal of Speech and Hearing Research* 35, 1189–1199.

- Tartter, V. C. (1989). The speech of a postlingually deafened teenager during the first year of use of a multichannel cochlear implant. *The Journal of the Acoustical Society of America* 86(6), 2113.
- Team R Core (2014). R: A Language and Environment for Statistical Computing. <http://www.R-project.org>.
- Todd, A. E., Edwards, J. R., & Litovsky, R. Y. (2011). Production of contrast between sibilant fricatives by children with cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America* 130(6), 3969–3979.
- Todd, A. E., Edwards, J. R., Litovsky, R. Y., & Li, F. (2010). Production of sibilant fricatives by children with cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America* 127(3), 1905.
- Uchanski, R. M. & Geers, A. E. (2003). Acoustic characteristics of the speech of young cochlear implant users: A comparison with normal-hearing age-mates. *Ear & Hearing* 24(1S), 90S–105S.
- Vandam, M., Ide-Helvie, D., & Moeller, M. P. (2011). Point vowel duration in children with hearing aids and cochlear implants at 4 and 5 years of age. *Clinical Linguistics & Phonetics* 25(8), 689–704.
- Walden, B. E., Montgomery, A. A., Prosek, R. A., & Hawkins, D. B. (1990). Visual biasing of normal and impaired auditory speech perception. *Journal of Speech Language and Hearing Research* 33(1), 163.
- Wells, J. C. (1997). SAMPA computer readable phonetic alphabet. *Handbook of Standards and Resources for Spoken Language Systems*.
- Weltgesundheitsorganisation (WHO) (2015). Deafness and hearing loss (Stand: Februar 2014). Online-Quelle, abgerufen am: 24.02.2015.
- Wikipedia (2015a). Graeme Clark. Online-Quelle, abgerufen am: 24.02.2015.
- Wikipedia (2015b). Helen Keller. Online-Quelle, abgerufen am: 24.02.2015.
- Wintermantel, E. & Ha, S.-W. (2008). *Medizintechnik - Life Science Engineering* (4 Aufl.). Springer Verlag, Berlin.

# Anhang A

## Sprachmaterial

untersuchte Lautklasse beziehungsweise Lautkombination (Anzahl)	Zielphonem(e)	Satz
<b>Lautklassen</b>		
Vokale (7)	/a:/ /e:/ /i:/ /o:/ /u:/ /2:/ /y:/	Ich habe 'Taten' gesagt. Ich habe 'stetig' gesagt. Ich habe 'Titel' gesagt. Ich habe 'Toter' gesagt. Ich habe 'Stute' gesagt. Ich habe 'töten' gesagt. Ich habe 'Tüte' gesagt.
Konsonanten (6) /s-S/  Palatale und velare Konsonanten	/s/ /S/  /c/ /g/ /x/ /k/	Hier steht 'Tasse' geschrieben. Hier steht 'Tasche' geschrieben.  Hier steht 'kriechen' geschrieben. Hier steht 'kriegen' geschrieben. Hier steht 'krachen' geschrieben. Hier steht 'Kraken' geschrieben.
<b>Lautkombinationen (Cluster)</b>		
Str-Cluster (6)	/Str/ /r/ /S/ /tr/ /Sr/ /t/	Dann ist 'streiten' dran. Dann ist 'reiten' dran. Dann ist 'scheitern' dran. Dann ist 'treiben' dran. Dann ist 'schreiten' dran. Dann ist 'teilen' dran.
Kn-/Kl-Cluster (5)	/kn/ /kl/ /k/ /l/ /n/	Ich habe 'Knappe' gehört. Ich habe 'Klappe' gehört. Ich habe 'Kappe' gehört. Ich habe 'Lappen' gehört. Ich habe 'Nappa' gehört.

Tabelle A.1: Überblick über alle Zielphoneme und Clusterkombinationen im gesamten Sprachmaterial. Gelesen am IPS: jew. 6 Wiederholungen / Audiologie Großhadern: jew. 5 Wiederholungen.

# Anhang B

## Versuchspersonenübersicht

VPN-Nummer	Gruppe	Alter	Geschlecht	Ursache der Ertaubung	CI-Hersteller
01	CI_4	80	w	unbekannt	Cochlear
02	CI_4	44	m	Meningitis	Med-El
03	CI_2	37	m	Frühgeburt	Cochlear
04	CI_4	51	w	Hörsturz / Meningitis	Cochlear
05	CI_4	63	m	Meningitis	Cochlear
06	CI_2	48	w	unbekannt	Med-El
07	CI_2	30	w	unbekannt	Cochlear
08	CI_2	22	w	unbekannt	Cochlear
09	CI_2	22	w	unbekannt	Cochlear
10	CI_4	62	m	Meningitis	Med-El
11	CI_4	28	w	Hörsturz	Med-El
12	CI_2	25	w	unbekannt	Cochlear
13	CI_4	67	w	Meningitis	Med-El
14	CI_4	72	w	unbekannt	Med-El
15	CI_4	69	w	unbekannt	Med El
16	CI_3	51	w	unbekannt	Med-El
17	CI_3	46	w	genetisch	Med-El
18	CI_4	70	m	Hörsturz	Med-El
19	CI_3	60	w	unbekannt	Med-El
20	CI_3	52	w	Mittelohrvereiterung	Advanced Bionics
21	CI_1	8	m	unbekannt	Med-El
22	CI_4	44	w	Mittelohrentzündung	Med-El
23	CI_4	64	m	Masern + Hörstürze	Med-El
24	CI_1	15	w	unbekannt	Cochlear
25	CI_2	15	w	unbekannt	Advanced Bionics

26	CI_1	8	m	unbekannt	Med-El
27	CI_2	18	w	unbekannt	Cochlear
28	CI_1	14	m	Impfung	Cochlear
29	CI_2	49	w	Meningitis	Med-El
30	CI_2	24	m	Meningitis	Cochlear
31	CI_1	9	w	unbekannt	Med-El
32	CI_2	16	w	unbekannt	Med-El
33	CI_2	18	w	unbekannt	Med-El
34	CI_4	63	w	unbekannt	Med-El
35	CI_2	64	w	unbekannt	Med-El
36	CI_3	41	w	unbekannt	Med-El
37	CI_4	78	w	unbekannt	Med-El
38	CI_2	22	w	unbekannt	Cochlear
39	CI_1	9	m	Antibiotika	Med-El
40	CI_1	15	m	Pneumokokken	Cochlear
41	CI_3	15	w	Aqueductus Vestibuli	Med-El
42	CI_2	42	m	Hörsturz	Cochlear
43	CI_2	29	w	Meningitis + Hörstürze	Med-El
44	CI_3	44	w	genetisch	Med-El
45	CI_4	44	w	Mittelohrentzündung	Cochlear
46	CI_3	43	m	Hörsturz	Med-El
47	CI_3	53	w	Meningitis	Cochlear
48	CI_1	8	w	genetisch	Med-El

Tabelle B.1: Tabellarische Übersicht über die an der Studie teilnehmenden CI-Träger \_ Teil 1.

VPN- Nummer	Art der Versorgung	Alter bei der Ertaubung (links / rechts)	Dauer ohne CI (links / rechts)	CI- Tragedauer (links / rechts)
01	unilateral (links)	30 / 28	34 / -	16 / -
02	bilateral	5 / 5	28 / 32	7 / 11
03	bilateral	0 / 0	36 / 28	1 / 9
04	unilateral (links)	36 / 4 Monate	3 / -	11 / -
05	bilateral	40 / 40	13 / 21	10 / 2
06	bilateral	0 / 0	44 / 46	4 / 2
07	unilateral (links)	0 / 0	28 / -	2 / -
08	bilateral	0 / 0	21 / 6	1 / 16
09	bilateral	0 / 0	21 / 19	1 / 3
10	bilateral	6 / 6	42 / 48	15 / 9
11	unilateral (links)	22 / -	6 Monate / -	6 / -

<b>12</b>	bilateral	0 / 0	24 / 8	1 / 16
<b>13</b>	unilateral (links)	57 / 57	8 / -	2 / -
<b>14</b>	unilateral (links)	54 / 54	8 / -	9 / -
<b>15</b>	unilateral (links)	44 / 30	20 / -	5 / -
<b>16</b>	bilateral	47 / 30	6 Monate / 17	3 / 4
<b>17</b>	bilateral	42 / 45	0 / 0	4 / 6 Monate
<b>18</b>	bilateral	50 / 58	8 / 8	12 / 4
<b>19</b>	unilateral (links)	49 / 46	1 / -	10 / -
<b>20</b>	unilateral (links)	43 / 43	6 Monate / -	9 / -
<b>21</b>	bilateral	0 / 0	5,5 / 2,5	3 / 6
<b>22</b>	bilateral	35 / 35	5 / 9	4 / 3 Monate
<b>23</b>	unilateral (rechts)	64 / 34	- / 29	- / 1
<b>24</b>	bilateral	0 / 0	2 / 8	13 / 7
<b>25</b>	bilateral	0 / 0	10 / 5	5 / 10
<b>26</b>	bilateral	0 / 0	1,5 / 1	7 / 7,5
<b>27</b>	bilateral	0 / 0	12 / 18	6 / 3 Monate
<b>28</b>	unilateral (rechts)	7 Monate / 7 Monate	- / 2	- / 12,5
<b>29</b>	unilateral (links)	3 / 3	39 / -	7 / -
<b>30</b>	unilateral (links)	0 / 0	4 / -	20 / -
<b>31</b>	bilateral	0 / 0	5 / 2	4 / 7
<b>32</b>	unilateral (links)	0 / 0	10,5 / -	6 / -
<b>33</b>	bilateral	0 / 0	10 / 9	8 / 9
<b>34</b>	bilateral	61 / 0	1 / 58	6 Monate / 5
<b>35</b>	unilateral (links)	0 / 0	60 / -	4 / -
<b>36</b>	bilateral	37 / 37	1 / 3	3 / 6 Monate
<b>37</b>	unilateral (links)	56 / 60	10 / -	12 / -
<b>38</b>	bilateral	0 / 0	21 / 9	1 / 13
<b>39</b>	bilateral	0 / 0	1,5 / 8 Monate	7,5 / 8
<b>40</b>	bilateral	1,5 / 1,5	7 / 1,5	6 / 13
<b>41</b>	bilateral	5 / 6	0 / 0	10 / 9
<b>42</b>	unilateral (links)	33 / 0	3 / -	6 / -
<b>43</b>	unilateral (rechts)	1,5 / 14	- / 6 Monate	- / 14
<b>44</b>	bilateral	39 / 39	5 / 1	0 / 4
<b>45</b>	bilateral	4 / 42	39 / 6 Monate	1 / 1,5
<b>46</b>	bilateral	32 / 39	0 / 0	11 / 4
<b>47</b>	unilateral (rechts)	2 Monate / 46	- / 1,5 Monate	- / 7
<b>48</b>	bilateral	0 / 0	3 / 1	5 / 7

Tabelle B.2: Tabellarische Übersicht über die an der Studie teilnehmenden CI-Träger \_ Teil 2.



VPN-Nummer	Gruppe	Alter	Geschlecht
51	KG_2	23	w
52	KG_2	24	w
53	KG_2	25	m
54	KG_4	43	w
55	KG_4	77	w
56	KG_4	27	w
57	KG_1	16	m
58	KG_1	10	m
59	KG_1	7	m
60	KG_4	70	m
61	KG_4	65	w
62	KG_4	61	m
63	KG_4	63	m
64	KG_2	28	w
65	KG_2	18	w
66	KG_3	60	w
67	KG_2	34	m
68	KG_4	62	m
69	KG_4	51	w
70	KG_3	54	w
71	KG_3	35	w
72	KG_1	14	m
73	KG_2	15	w
74	KG_1	15	w
75	KG_2	15	w
76	KG_1	8	m
77	KG_4	42	w
78	KG_3	50	w
79	KG_2	20	w
80	KG_3	15	w
81	KG_2	50	w
82	KG_2	21	w
83	KG_4	50	m
84	KG_3	38	w
85	KG_2	26	w
86	KG_1	8	w
87	KG_4	71	w
88	KG_4	71	w
89	KG_3	33	m
90	KG_2	21	w
91	KG_2	66	w
92	KG_2	43	m
93	KG_4	70	w
94	KG_2	43	w
95	KG_3	51	w
96	KG_4	65	w
97	KG_3	52	w
98	KG_1	8	w
3S	KG_4	64	m

Tabelle B.3: Tabellarische Übersicht über die an der Studie teilnehmenden Kontrollgruppensprecher.

# Anhang C

## Danksagung

Ich möchte mich vor allem bei meinem Doktorvater PD Dr.habil. Dr.-Ing Florian Schiel bedanken. Dafür, dass er mich in meinem Promotionsvorhaben so stark unterstützt hat und mir somit die Arbeit mit CI-Trägern im Rahmen dieses Projekts überhaupt ermöglicht hat. Des Weiteren natürlich auch für die Betreuung der Arbeit, während der er immer ein offenes Ohr für mich und wertvolle Ideen und Anregungen für meine Arbeit hatte. Außerdem möchte ich mich bei Prof. Dr. Phil Hoole für seine wertvollen Kommentare bedanken und dafür dass ich mich mit meinen Fragen jederzeit an ihn wenden konnte.

Außerdem möchte ich mich bei Priv. Doz. Dr. med. Maria Schuster bedanken, für die gute Zusammenarbeit mit der HNO des Klinikum Großhadern, in deren Rahmen meine Langzeitstudie entstanden ist. Danke für die vielen Treffen und Ideen. Ein Dankschön geht auch an Dr. rer. biol. hum. Dipl.-Ing. Stefan Zirn für seine aufschlussreichen Erläuterungen und Anregungen.

Ein großer Dank gilt Lisa Wälischmiller, die alle Aufnahmen, die ich in dieser Arbeit ausgewertet habe segmentiert hat und mit ihrem außergewöhnlichen Engagement eine große Stütze für mich war. Danke auch an Christian Heinrich und Barbara Baumeister für die gemeinsame Zeit im Büro, für alle Hilfe und Unterstützung bei sämtlichen großen und kleinen Problemen und vor allem an den Christian fürs Korrekturlesen meiner Arbeit. Für das Korrigieren meiner Arbeit mit allen Kommafehlern und bayerischer Grammatik möchte ich mich außerdem bei Sandra Oswald und Simone Rossner bedanken.

Ich möchte mich natürlich auch bei meiner Familie bedanken, bei meinen Eltern und meinem Bruder Thomas, dass sie mich immer unterstützt haben. Ein riesengroßes Dankeschön geht an meinen Ehemann Harald, dass er immer für mich da war, mir den Rücken frei gehalten hat und mich in allem so stark unterstützt hat. Danke für alles. Außerdem möchte ich mich bei meinem Sohn Moritz bedanken, dafür dass er mich immer wieder auf andere Gedanken und vor allem immer zum Lachen gebracht hat. Bei Annika Beck möchte ich mich für die viele Zeit bedanken, die sie mir durch ihre liebevolle Kinderbetreuung zum Arbeiten verschafft hat und für die vielen aufmunternden Worte.

Ein sehr wichtiges und großes Dankeschön gilt natürlich den vielen CI-Trägern, die an meiner Studie teilgenommen haben. Namentlich möchte ich mich bei Regine Zille für ihre große Hilfe und die Antworten auf viele Fragen bedanken. Außerdem möchte ich mich bei Herrn Arnold Erdsiek für die interessanten und hilfreichen Gespräche bedanken. Des Weiteren möchte ich mich bei den vielen Kontrollgruppensprechern bedanken, die mich durch ihre Teilnahme am Experiment unterstützt haben.

Abschließend gilt mein Dank der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung des Projektes HO 3271/5-1 in dessen Rahmen diese Arbeit entstanden ist.